

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E DE PETRÓLEO

MARCUS FÉLIX MAGALHÃES

**Utilização de simulação de elementos discretos (DEM) para avaliação de
parâmetros da teoria da amostragem**

SÃO PAULO
2022

MARCUS FÉLIX MAGALHÃES

Utilização de simulação de elementos discretos (DEM) para avaliação de parâmetros da teoria da amostragem

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Mineral

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Carolina Chierigati

Coorientador: Prof. Dr. Dusan Ilic

SÃO PAULO
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 12 de outubro de 2022

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catálogo-na-publicação

Magalhães, Marcus Félix

Utilização de simulação de elementos discretos (DEM) para avaliação de parâmetros da teoria da amostragem / M. F. Magalhães -- versão corr. -- São Paulo, 2022.

141 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.AMOSTRAGEM DE MINÉRIOS 2.OURO 3.SIMULAÇÃO 4.ESTUDO DE CASO (SANTA BÁRBARA (MG)) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Nome: MAGALHÃES, Marcus Félix

Título: Utilização de simulação de elementos discretos (DEM) para avaliação de parâmetros da teoria da amostragem

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: [19/09/2022](#)

Banca examinadora

Profa. Dra.

[Ana Carolina Chieregati](#)

Instituição:

[Universidade de São Paulo](#)

Julgamento:

[Aprovado](#)

Prof. Dr.

[Rodrigo Magalhães de Carvalho](#)

Instituição:

[Universidade Federal do Rio de Janeiro](#)

Julgamento:

[Aprovado](#)

Prof. Dr.

[Daniel Armelino Bortoleto](#)

Instituição:

[Universidade de São Paulo/Ecolab](#)

Julgamento:

[Aprovado](#)

Dedico este trabalho a minha esposa e filha, com amor, admiração e gratidão por todos os momentos de apoio e paciência, sempre com um carinhoso beijo de boa sorte.

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Ana Carolina Chierigati, que além de orientadora, foi amiga, e me abriu as portas do universo magnífico da disciplina de Amostragem.

Aos amigos da Universidade de Newcastle (Austrália), que se dedicaram a me ensinar ferramentas específicas para desenvolvimento do trabalho.

À ESSS que disponibilizou gratuitamente a licença do software Rocky DEM para realização do trabalho.

Aos colegas da AngloGold Ashanti, pelo fornecimento dos dados e informações, além de todo apoio e compreensão ao longo de todo caminho percorrido.

RESUMO

MAGALHÃES, M. F. **Utilização de simulação de elementos discretos (DEM) para avaliação de parâmetros da teoria da amostragem.** 2022. Tese (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, São Paulo, 2022.

Amostradores corta-fluxo e amostradores rotativos são largamente utilizados na indústria da mineração para obtenção de amostras representativas de fluxos particulados. A teoria da amostragem (TOS ou *Theory of Sampling*), criada pelo químico francês Pierre Gy na segunda metade do século XX, abrange uma série de fundamentos matemáticos e estatísticos, além de recomendações práticas e empíricas que são amplamente utilizadas como base para estudos modernos no campo da amostragem. Simulações e análises pelo Método dos Elementos Discretos (DEM) podem ser usadas para investigar influências de parâmetros operacionais, projeto do amostrador e as propriedades físicas do minério na geração do Erro de Extração do Incremento (IEE), que, quando presente, resulta em uma amostragem enviesada e não representativa. O presente estudo investiga a aplicação prática de regras e recomendações propostas pelo Dr. Pierre Gy, que desenvolveu e estabeleceu os princípios para a correta extração de amostras em equipamentos industriais. Os resultados validam a teoria da amostragem de Pierre Gy em um sistema de amostragem composto por um amostrador primário corta-fluxo e um amostrador secundário rotativo (tipo *Vezin*) na alimentação de uma usina para tratamento de minério sulfetado de ouro.

Palavras-chave: teoria da amostragem; estatística; simulação de elementos discretos; processamento mineral.

ABSTRACT

MAGALHÃES, M. F. **Use of discrete element modeling (DEM) to evaluate parameters of the theory of sampling.** 2022. Tese (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, São Paulo, 2022.

Cross-stream cutters and rotative cutters are widely used in the mining industry to obtain representative samples of particulate flows. The Theory of Sampling (TOS), developed by the chemistry Pierre Gy in the second half of the XX century, includes a set of statistical and mathematical fundamentals, in addition to practical and empirical recommendations that are used as a basis for modern studies in the sampling field. Discrete Element Method (DEM) simulation and analysis can be used to investigate the influences of operational parameters, sampler design and physical properties of the ore in the generation of the Increment Extraction Error (IEE), which, when present, frequently results in a biased, non-representative sample. This study investigates the practicality of the rules and recommendations proposed by Dr. Pierre Gy, who developed and established the principles of correct sample extraction in industrial sampling equipment. Results validate Pierre Gy's sampling theory using DEM in a sampling system composed of a primary cross-stream cutter and a secondary rotative cutter (Vezin type) in the plant feed of a sulphide gold ore.

Keywords: theory of sampling; statistics; discrete element modelling; mineral processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - AngloGold Ashanti, CDS, localização geográfica da usina no Brasil (meramente ilustrativo, sem escala).....	20
Figura 2 - Parâmetros para dimensionamento de amostradores	23
Figura 3 - Representação dos componentes do erro global de estimativa.....	28
Figura 4 - Retirada de incremento em lote unidimensional	30
Figura 5 - Comparativo entre os processos incremental e de divisão	33
Figura 6 - Amostrador linear corta-fluxo interceptando um fluxo cadente	35
Figura 7 - Amostrador rotativo corta-fluxo interceptando um fluxo cadente	36
Figura 8 - Amostrador rotativo sob cone interceptando um fluxo cadente	37
Figura 9 - Amostrador rotativo setorial	38
Figura 10 – Ricochetear do fragmento pela faca do amostrador.....	39
Figura 11 - Componentes do movimento atuantes no fragmento na coleta do incremento.....	40
Figura 12 - Projeto correto das facas do amostrador	41
Figura 13 - Dimensionamento correto de um amostrador inclinado	42
Figura 14 – Esquema ilustrativo da sobreposição normal entre duas partículas para o modelo de histerese linear	47
Figura 15 - Componentes principais de um procedimento genérico de calibração DEM	52
Figura 16 - Princípio do teste de escoamento livre	54
Figura 17 - Princípio do teste de escoamento em caixa.....	55
Figura 18 - Princípio do teste de escoamento central	55
Figura 19 - Picnômetros usados em laboratório para determinação da densidade de sólidos	57
Figura 20 - Determinação da densidade aparente em proveta	58
Figura 21 - a) Peneirador horizontal quadrado; b) Peneirador suspenso; c) Peneirador de bancada.....	58
Figura 22 - Localização do complexo Córrego do Sítio.....	66
Figura 23 - Imagem de satélite mostrando os limites do complexo Córrego do Sítio - Mina CDSI (em vermelho) Mina CDSII (em roxo)	66
Figura 24 - Localização da região do quadrilátero ferrífero na parte sul do Cráton do São Francisco.	67

Figura 25 - a) Ouro livre; b) Ouro incluído na bertierita; c) Ouro fino incluído na arsenopirita; d) Ouro exposto na arsenopirita; e) Ouro incluído na pirita; f) Ouro incluído no quartzo.	68
Figura 26 - Fluxograma geral da usina de beneficiamento de minério sulfetado CDSII	70
Figura 27 - Arranjo geral dos amostradores primário e secundário.....	72
Figura 28 - Detalhe da descarga dos dois alimentadores e posição do amostrador primário	72
Figura 29 - Geometria 3-D do equipamento de amostragem primária (esquerda). Vista lateral do amostrador implementado no Rocky DEM e fotos reais do equipamento em operação (direita): a) início b) meio c) final do corte	73
Figura 30 - Geometria 3-D do equipamento de amostragem secundária (esquerda): a) vista superior e b) vista lateral do amostrador implementado no Rocky DEM	75
Figura 31 – Determinação da densidade aparente em proveta	77
Figura 32 - Teste de escoamento em caixa	77
Figura 33 - Teste de escoamento livre	78
Figura 34 - Teste de escoamento central.....	79
Figura 35 - Fluxo de otimização dos parâmetros DEM	80
Figura 36 - a) Teste de escoamento livre; b) Teste de escoamento em caixa; c) Teste de escoamento central	85
Figura 37 - Resultados para (a) teste de escoamento livre; (b) teste de escoamento em caixa; e (c) teste de escoamento central.....	89
Figura 38 - Distribuição granulométrica da amostra do produto britado	90
Figura 39 - Gráfico de Pareto para resposta em ângulo de repouso (teste de escoamento livre)	92
Figura 40 - Gráfico de Pareto para resposta em ângulo de atrito interno (teste de escoamento em caixa)	93
Figura 41 - Gráfico de Pareto para resposta em ângulo de repouso (teste de escoamento central).....	93
Figura 42 - Gráfico de Pareto para resposta em ângulo de atrito interno (teste de escoamento central).....	94
Figura 43 - Resultado do teste de escoamento central da Solução 1 ($\mu_r = 0,89$; $\mu_a = 0,61$; $f_a = 0,72$)	97

Figura 44 - Curvas <i>Desirability</i> para a Solução 2	98
Figura 45 - Comparação entre os testes de laboratório e simulações DEM utilizando os parâmetros de contato calibrados (Solução 2): a) teste de escoamento livre; b) teste de escoamento em caixa; e c) teste de escoamento central.....	99
Figura 46 - Sistema de amostragem e amostradores primário e secundário	100
Figura 47 - Extração do amostrador primário em função da abertura das facas do amostrador	101
Figura 48 - Vista em foco do amostrador em duas simulações distintas. Velocidade das partículas no topo do amostrador: azul escuro baixa velocidade e azul claro alta velocidade. a) Simulação 05: 4xD; b) Simulação 01: 1xD.....	102
Figura 49 - Extração do amostrador secundário em função da abertura das facas do amostrador	103
Figura 50 - Vista de topo do sistema mostrando as partículas dentro do amostrador. As partículas estão coloridas de acordo suas velocidades, sendo: azul escuro baixa velocidade e azul claro alta velocidade. a) Simulação 05: 60°, b) Simulação 04: 50°, c) Simulação 03: 40°, d) Simulação 02: 30°, e) Simulação 01: 20°	104
Figura 51 - Extração do amostrador primário em função do ângulo da calha do amostrador	104
Figura 52 – Partículas coletadas na alíquota final da Simulação 01: 20° para avaliação do ângulo da calha do amostrador	105
Figura 53 - Extração do amostrador primário em função do ângulo das facas do amostrador	105
Figura 54 - Extração do amostrador secundário em função do ângulo das facas do amostrador	106
Figura 55 – Representação da Simulação 03: 35°, mostrando o acúmulo de partículas finas depositadas sobre a faca do amostrador primário. Partículas vermelhas representam o grupo de 2,5 mm e partículas amarelas representam o grupo de 6,3 mm.	106
Figura 56 - Representação da Simulação 03: 35°, mostrando o acúmulo de partículas finas depositadas sobre as facas do amostrador secundário. Partículas vermelhas representam o grupo de 2,5 mm e partículas amarelas representam o grupo de 6,3 mm.	107

Figura 57 - Simulação DEM mostrando o efeito de arraste das partículas finas para a amostra. Partículas finas estão representadas em vermelho (2,5 mm) e partículas grossas são representadas em azul escuro (15 mm).....	108
Figura 58 - Extração do amostrador primário em função da velocidade do amostrador	109
Figura 59 - Extração do amostrador secundário em função da velocidade do amostrador	110
Figura 60 - Extração do amostrador primário em função da vazão de sólidos.....	110
Figura 61 - Extração do amostrador secundário em função da vazão de sólidos ...	111
Figura 62 – Extração do amostrador secundário por incremento coletado	114
Figura 63 - Segregação de finos na correia. a) amostra primária; b) amostra primária em transferência; c) amostra primária alimentando o amostrador secundário. Partículas finas (2,5 mm) estão representadas em vermelho e a seta indica sentido do fluxo.....	115
Figura 64 - a) Estratificação da amostra na correia de alimentação antes das modificações; b) estratificação da amostra na correia de alimentação depois das modificações	116
Figura 65 – Comparativo entre as extrações no amostrador secundário antes e depois das melhorias no sistema.....	117
Figura 66 - Extração do amostrador secundário por incremento coletado após melhorias no sistema	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis baixos e altos adotados para montagem do experimento fatorial.	83
Tabela 2 - Planejamento do experimento fatorial	84
Tabela 3 - Determinação dos níveis para cada parâmetro simulado	86
Tabela 4 - Resumo dos resultados dos testes de laboratório.....	88
Tabela 5 – Resumo da distribuição granulométrica e teor de ouro por grupo de partícula	89
Tabela 6 - Parâmetros resposta da matriz DOE.....	91
Tabela 7 – Definição dos alvos para o otimizador de resposta	96
Tabela 8 - Soluções otimizadas	96
Tabela 9 - Respostas simuladas para as três soluções do otimizador.....	97
Tabela 10 - <i>Desirability</i> individual para cada um dos parâmetros das soluções propostas pelo otimizador	98
Tabela 11 – Comparação entre os teores do lote e da amostra primária.....	109
Tabela 12 – Resumo da extração para abertura das facas do amostrador.....	112
Tabela 13 - Resumo da extração para ângulo da calha do amostrador.....	112
Tabela 14 - Resumo da extração para ângulo das facas do amostrador	112
Tabela 15 - Resumo da extração para velocidade do amostrador	112
Tabela 16 - Resumo da extração para vazão de sólidos no amostrador	113
Tabela 17 - Análise estatística da extração no amostrador secundário	114
Tabela 18 - Análise estatística da extração no amostrador secundário após melhorias implementadas	117

LISTA DE SIGLAS

AE	Erro Analítico
ANOVA	Análise de Variância
CCD	Lavagem Contra Corrente
CDS	Córrego do Sítio
CDSI	Córrego do Sítio I
CDSII	Córrego do Sítio II
CIL	Carvão em Lixiviação
DEM	Método dos Elementos Discretos
DOE	Planejamento de Experimento
ESSS	Engineering Simulation and Scientific Software
FFD	Experimento Fatorial Completo
FSE	Erro Fundamental de Amostragem
GSE	Erro de Segregação e Agrupamento
HFE	Erro de Flutuação de Heterogeneidade
IDE	Erro de Delimitação do Incremento
IEE	Erro de Extração do Incremento
IME	Erro de Materialização do Incremento
IPE	Erro de Preparação do Incremento
IWE	Erro de Ponderação do Incremento
MIBC	Metil Isobutil Carbinol
OEE	Erro Global de Estimativa
PAX	Amil Xantato de Potássio
QFE	Erro de Flutuação de Qualidade
ROM	Run of Mine
RSM	Metodologia de Superfície de Resposta
TOS	Teoria da Amostragem
TSE	Erro Total de Amostragem

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Abertura das facas do amostrador
μ_a	Coefficiente de atrito
μ_r	Coefficiente de rolamento
c	Comprimento do amostrador ou fator constituição mineralógica
d	Densidade ou tamanho máximo dos fragmentos (d_{95})
d_{95}	Abertura pela qual passam 95% em massa do material
E	Módulo elástico
f	Fator forma
F	Força
f_a	Força de atração
f_{adh}	Fração da força gravitacional
g	Fator granulometria ou aceleração da gravidade
h	Altura da faca do amostrador
I	Momento de inércia
K	Rigidez
l	Fator liberação
m	Massa
M_L	Massa do lote
M_S	Massa da amostra
p	Profundidade do amostrador
P_{80}	Abertura pela qual passam 80% em massa do material
Q	Vazão
R^2	Coefficiente da equação de regressão
r_K	Rigidez tangencial
s^2_{FSE}	Variância relativa do erro fundamental de amostragem
s^2_{GSE}	Variância relativa do erro de segregação e agrupamento
u	Distância entre o amostrador e o tubo de alimentação do amostrador
V	Volume
$V_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima
Y	Fator de agrupamento
Z	Fator de segregação

α	Ângulo da calha do amostrador
β	Ângulo com relação a vertical da faca do amostrador
δ_{adh}	Distância de adesão
ε	Coeficiente de restituição
θ	Diâmetro do tubo de alimentação do amostrador
λ	Constante adimensional que limita a rigidez de descarregamento
Υ	Ângulo com relação a horizontal da faca do amostrador

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	OBJETIVOS	24
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1	A TEORIA DA AMOSTRAGEM	25
3.1.1	Erros Aleatórios, Sistemáticos e Representatividade	26
3.1.2	Os Erros de Amostragem	27
3.1.2.1	O erro fundamental de amostragem (FSE)	28
3.1.2.2	O erro de segregação e agrupamento (GSE)	28
3.1.2.3	O erro de ponderação do incremento (IWE) e o erro de flutuação de qualidade (QFE)	29
3.1.2.4	O erro de flutuação de heterogeneidade (HFE)	30
3.1.2.5	O erro de materialização do incremento (IME)	30
3.1.2.6	O erro total de amostragem (TSE)	31
3.1.2.7	O erro analítico (AE)	31
3.1.2.8	O erro global de estimativa (OEE)	32
3.1.3	A Amostragem em Circuitos Industriais	32
3.1.3.1	Amostradores lineares corta-fluxo	34
3.1.3.2	Amostradores rotativos corta-fluxo	35
3.1.3.3	Amostradores rotativos sob cone	36
3.1.3.4	Amostradores rotativos setoriais	37
3.1.4	O IEE nos Equipamentos de Amostragem	38
3.2	O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)	44
3.2.1	Modelos de Contato e Adesão no DEM	45
3.2.1.1	Modelo de histerese linear	46
3.2.1.2	Modelo de atrito de Coulomb	48
3.2.1.3	Modelo de adesão constante	50

3.2.2	Calibração e Caracterização dos Materiais Particulados	50
3.2.2.1	Testes laboratoriais	54
3.2.2.2	Caracterização de outras propriedades físicas	56
3.2.3	Rocky DEM	59
3.3	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO E MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	60
3.3.1	Software de Análise Estatística	62
3.3.2	Regressão Simples e Multivariada	63
3.3.3	Função <i>Desirability</i>	64
4	DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO	65
4.1	LOCALIZAÇÃO	65
4.2	ASPECTOS GEOLÓGICOS	67
4.3	DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO	69
4.4	SISTEMA DE AMOSTRAGEM DA ALIMENTAÇÃO DA USINA	71
4.4.1	Especificações do Amostrador Primário	73
4.4.2	Especificações do Amostrador Secundário	74
5	MATERIAIS E MÉTODOS	76
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
6.1	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS	88
6.2	CALIBRAÇÃO DO MODELO DE CONTATO	90
6.2.1	Análise do experimento fatorial	91
6.2.2	Otimização dos parâmetros DEM	95
6.2.3	Validação dos parâmetros DEM otimizados	97
6.3	SIMULAÇÕES E ANÁLISES	100
6.3.1	Abertura das facas do amostrador	101
6.3.2	Ângulo da calha do amostrador	103
6.3.3	Ângulo das facas do amostrador	105
6.3.4	Velocidade do amostrador	107

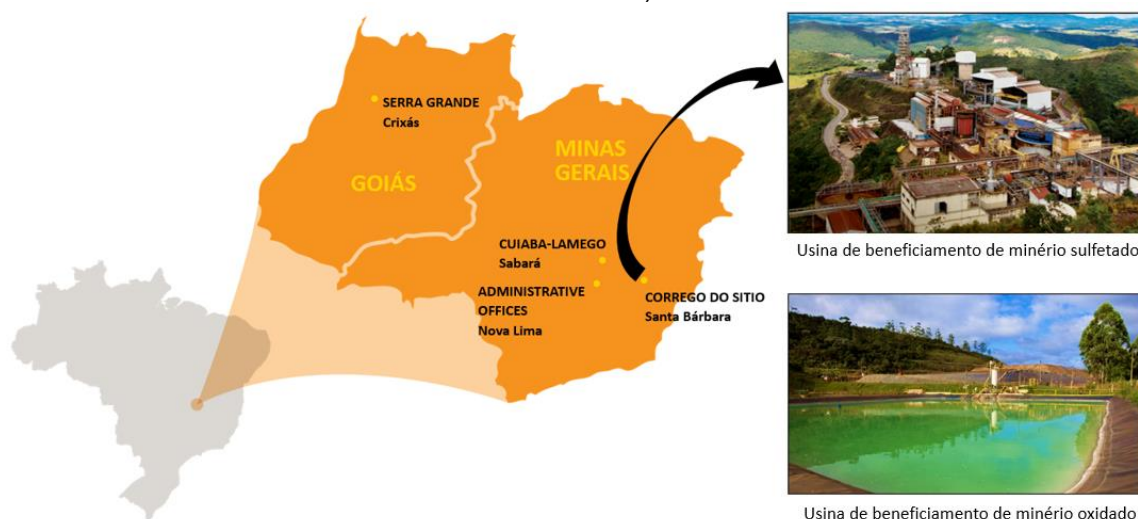
6.3.5	Vazão de sólidos no amostrador	110
6.3.6	Resumo das simulações	111
6.3.7	Melhorias implementadas a partir das simulações	113
7	CONCLUSÕES	119
	REFERÊNCIAS	122
	APÊNDICE A – Taxa de extração para abertura das facas do amostrador	128
	APÊNDICE B – Taxa de extração para ângulo da calha do amostrador	131
	APÊNDICE C – Taxa de extração para ângulo da faca do amostrador	133
	APÊNDICE D – Taxa de extração para velocidade do amostrador	136
	APÊNDICE E – Taxa de extração para vazão de alimentação de sólidos	139

1 INTRODUÇÃO

AngloGold Ashanti é uma empresa de mineração e a quarta maior produtora de ouro do mundo. No Brasil, a AngloGold Ashanti possui operações nos estados de Minas Gerais e Goiás (Figura 1). O complexo Córrego do Sítio (CDS) está localizado na cidade de Santa Bárbara, no estado de Minas Gerais, e tem extraído ouro de minas subterrâneas e a céu aberto nos últimos 187 anos. O ouro extraído das minas subterrâneas está associado principalmente a sulfetos, representando 75% do ouro total produzido no complexo. A usina de processamento de minério sulfetado é composta por um circuito de cominuição, concentração via flotação, pré-tratamento do concentrado pelo processo de oxidação ácida sob pressão, lixiviação e recuperação de ouro por eletrodeposição.

O processo de amostragem é de fundamental importância nos circuitos industriais, onde é essencial a obtenção de alíquotas representativas de teores, umidade, ou distribuição granulométrica de um lote. A teoria da amostragem (*Theory of Sampling*, ou simplesmente TOS), criada pelo químico francês Pierre Gy na segunda metade do século XX, abrange uma série de fundamentos matemáticos e estatísticos, além de recomendações práticas e empíricas (GY, 1992). Essa teoria é largamente usada para estudos modernos no campo de amostragem de minérios de ouro e reconciliação metalúrgica (CHIEREGATI et al., 2019).

Figura 1 - AngloGold Ashanti, CDS, localização geográfica da usina no Brasil (meramente ilustrativo, sem escala)



Fonte - Acervo do autor.

Baseado na teoria da amostragem de Pierre Gy, o processo para estimativa de teores é dividido basicamente em três principais estágios: (1) a amostragem primária do lote, (2) a amostragem secundária ou preparação da amostra, e (3) a análise química. Cada estágio gera um erro de amostragem caracterizado por sua variância, que, quando somados, resultam no erro global de estimativa (OEE). De todos esses erros, o erro de extração de incremento (IEE) pode ser considerado a principal fonte de viés na amostragem (PITARD, 1993) e é diretamente influenciado pelas propriedades físicas do minério e pelo projeto do amostrador (CHIEREGATI; PITARD, 2018).

Pierre Gy propôs uma série de parâmetros que servem como guias para o correto dimensionamento dos equipamentos de amostragem. Parâmetros como abertura, ângulo e velocidade do amostrador são os mais usados em projetos novos ou *greenfield* e abrangem uma série de especificações técnicas e práticas. Entretanto, em projetos *brownfield* com restrição de espaço e *layout* complexo, torna-se cada vez mais difícil o dimensionamento de equipamentos que sejam economicamente viáveis e que atendam a todas as recomendações pré-estabelecidas.

Devido à alta variabilidade das propriedades físicas do minério, os parâmetros recomendados para dimensionamento dos equipamentos de amostragem devem ser utilizados de maneira cuidadosa, e não podem ser tomados como verdades universais (PITARD, 2019). Assim sendo, um estudo prévio detalhado das propriedades físicas do minério deve ser considerado antes do dimensionamento dos amostradores para cada aplicação. Baseado no estudo de caracterização física do minério, aliado à simulação de elementos discretos, é possível avaliar os parâmetros da teoria da amostragem e determinar as melhores condições operacionais e de projeto.

Os testes industriais, ou mesmo testes experimentais específicos, geralmente são restritos e de difícil acesso, levando à busca de métodos computacionais específicos para a simulação do fluxo de minério particulado nos amostradores, permitindo, em um número irrestrito de simulações, a avaliação dos parâmetros da teoria da amostragem e a determinação das melhores configurações de projeto e operação.

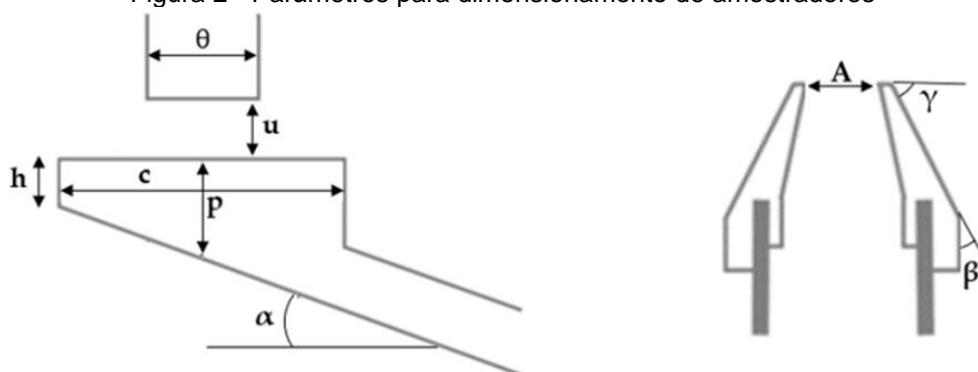
A simulação de elementos discretos cresceu rapidamente na indústria, como uma ferramenta capaz de realizar tal tarefa. O método tem capacidade de calcular o movimento de cada partícula do sistema dentro de um campo de simulação e as interações entre si, através de modelos de contato. Os parâmetros do modelo incluem os coeficientes de restituição e atrito. Uma das primeiras aplicações de DEM na modelagem de amostradores foi desenvolvido para amostradores do tipo corta-fluxo, *cross-belt* e rotativos (tipo *Veizin*) (CLEARY; ROBINSON, 2011a, 2011b; CLEARY; ROBINSON; SINNOTT, 2005; ROBINSON; SINNOTT, 2011).

Segundo Cleary e Robinson (2011b), o uso de simulação de elementos discretos na investigação do funcionamento de amostradores apresenta uma vantagem sobre os procedimentos experimentais, pois as simulações permitem o uso de uma amostra de referência que pode ser exatamente igual a uma amostra do fluxo de minério, eliminando, assim, uma parte significativa da variabilidade e permitindo obter amostras representativas com menos repetições.

Subsequentemente, uma série de trabalhos foram desenvolvidos no campo da simulação para avaliar viés em diferentes tipos de amostradores, para diferentes materiais particulados e fluxos de minério na usina (CLEARY et al., 2008; CLEARY; ROBINSON, 2008, 2011a; CLEARY; ROBINSON; SINNOTT, 2005; ROBINSON; SINNOTT, 2011). Infelizmente, além desses estudos, a bibliografia sobre investigação de sistemas de amostragem usando DEM é bastante limitada.

É essencial que o projeto do sistema de amostragem seja correto para extrair incrementos acurados, ou seja, sem viés. Com base na teoria da amostragem de Pierre Gy e em estudos realizados por Pitard (2019), a Figura 2 mostra recomendações para o dimensionamento correto de amostradores visando mitigar o IEE.

Figura 2 - Parâmetros para dimensionamento de amostradores



Parâmetro	Recomendação	Comentário
α	15° - 30°	Polpa
α	45° - 70°	Material particulado
u	$\geq 3d + 1$ cm	d = diâmetro top size
c	$\geq \theta + 30$ cm	Amostras grandes
c	$\geq \theta + 10$ cm	Amostras pequenas ou fluxo pequeno
h	≥ 10 cm	Ou menor para amostradores rotativos ou fluxos pequenos
p	$\geq 2/3 c$	Maior para fluxos grandes
$V_{m\acute{a}x}$	60 cm/s	Amostradores corta fluxo
$V_{m\acute{a}x}$	45 cm/s	Amostradores rotativos
$V_{m\acute{a}x}$	30 cm/s	Amostradores rotativos com $d < 80$ cm

Parâmetro	Recomendação	Comentário
A	$\geq 3d + 1$ cm	d = diâmetro top size
$\beta ; \gamma$	$\leq 20^\circ ; \geq 70^\circ$	-

Fonte – Modificado de Chieregati et al. (2018).

Ressalta-se que essas recomendações se baseiam nos princípios da teoria da amostragem para evitar erros grosseiros, entretanto, vale ressaltar que esses parâmetros não levam em consideração as propriedades físicas do material a ser amostrado.

O presente trabalho visa validar e recomendar novos parâmetros para a teoria da amostragem de Pierre Gy, utilizando simulações DEM para análise do sistema de amostragem da alimentação da usina de tratamento de minério sulfetado de ouro de CDSII. As simulações forneceram informações válidas para a avaliação do erro de extração do incremento (IEE) e suas influências na alimentação da usina.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo validar ou recomendar novos parâmetros e regras à teoria da amostragem de Pierre Gy, a partir da realização de simulações computacionais do sistema de amostragem da alimentação da usina de minério sulfetado de ouro da AngloGold Ashanti CDSII. Foi utilizada simulação de elementos discretos para a validação das regras referentes à minimização de erros associados à extração do incremento (IEE).

Os objetivos específicos deste trabalho foram os seguintes:

- i. Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre a aplicação do método de elementos discretos em equipamentos de amostragem;
- ii. Criar um modelo tridimensional do sistema de amostragem de CDSII;
- iii. Estabelecer uma calibração consistente do modelo de contato partícula-partícula, utilizando ferramentas estatísticas para tal;
- iv. Realizar simulação DEM dos amostradores (primário e secundário) do sistema de amostragem de CDSII;
- v. Quantificar o desempenho de cada amostrador quanto à extração correta da amostra;
- vi. Propor melhorias ou mudanças nos parâmetros do sistema por meio de simulações visando garantir uma amostragem representativa;
- vii. Propor novos parâmetros à teoria da amostragem de Pierre Gy.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos relacionados ao tema do trabalho em três grandes áreas, quais sejam, a teoria da amostragem, o método dos elementos discretos, planejamento de experimentos e métodos de otimização.

3.1 A TEORIA DA AMOSTRAGEM

Pierre Gy apresentou pela primeira vez seus estudos sobre estatística e amostragem em 1967, o que seria, mais tarde, traduzido como as bases de sua Teoria da Amostragem (PITARD, 2009). Nos dias atuais, quase 60 anos após a publicação dos primeiros estudos de Pierre Gy, algumas indústrias do setor mineral ainda estão se adequando aos conceitos da teoria da amostragem, mas grande parte delas negligenciam essa prática (FRANÇOIS-BONGARÇON, 2004).

A amostragem é definida pelo ato ou processo de seleção de uma amostra representativa de um todo, chamado de lote. Dificilmente essa amostra representará exatamente as mesmas características do lote da qual foi retirada, devido aos erros gerados no decorrer das operações de amostragem. Esses erros são gerados devido à heterogeneidade do lote, que pode ser dividida em duas categorias: heterogeneidade de constituição e heterogeneidade de distribuição.

Chama-se de heterogeneidade de constituição o tipo de heterogeneidade com a qual nos defrontamos quando consideramos as propriedades fundamentais dos fragmentos de um lote, observando-os um a um (CHIEREGATI; PITARD, 2018). A heterogeneidade de constituição é relativa aos fragmentos de um lote, a um determinado grau de cominuição. É uma propriedade intrínseca do lote e não pode variar, a não ser que seja realizada outra etapa de cominuição (PITARD, 1993). Já a heterogeneidade de distribuição é o tipo de heterogeneidade com a qual nos defrontamos quando consideramos um lote como uma série de grupos, cada um deles constituído por um certo número de fragmentos vizinhos. A heterogeneidade de

distribuição depende da heterogeneidade de constituição, da distribuição espacial dos fragmentos e da forma do lote (CHIEREGATI; PITARD, 2018).

3.1.1 Erros Aleatórios, Sistemáticos e Representatividade

Os erros de amostragem são variáveis aleatórias caracterizadas por uma média (diferente ou não de zero) e uma variância (diferente de zero). Os erros puramente aleatórios são caracterizados por média igual a zero e variância diferente de zero, enquanto os erros sistemáticos têm média diferente de zero. Em resumo todos os erros têm dois componentes, um componente aleatório e um componente não-aleatório. Os erros de amostragem são cumulativos e, segundo Chieregati e Pitard (2018), erros sistemáticos podem ser evitados se as seguintes condições forem satisfeitas:

- i. Todo o lote deve ser acessível ao amostrador, de modo que exista, para cada fragmento do lote, uma chance idêntica de fazer parte da amostra;
- ii. O plano de amostragem deve ser imparcial, de modo que exista, para cada fragmento do lote, uma chance idêntica de fazer parte da amostra;
- iii. A distribuição de teores das amostras deve obedecer a uma distribuição normal, o que é uma hipótese otimista no caso de elementos-traço e minérios de baixo teor.

Um processo de amostragem é dito representativo quando ele é preciso o suficiente e acurado o suficiente para um determinado objetivo. A acurácia se refere à proximidade da medida ao valor verdadeiro da variável, enquanto a precisão se refere à proximidade dos valores obtidos pela repetição de um determinado processo. Em linhas gerais, um processo de amostragem representativo é um processo suficientemente preciso e que não gera viés. Para evitar a geração de vieses no processo de amostragem, deve-se somente utilizar equipamentos de dimensionamento correto e que seguem as diretrizes da teoria da amostragem.

Estatisticamente, a correta seleção do incremento para composição da amostra requer que todas as partes de um mesmo lote tenham exatamente as mesmas chances de serem amostradas (PITARD, 2004) e que, conseqüentemente, qualquer fragmento que não pertença ao lote tenha chance zero de ser amostrado. Esta condição garante a acurácia do processo, visto que qualquer enviesamento irá anulá-la (FRANÇOIS-BONGARÇON; GY, 2002). Assim sendo, a representatividade é atingida quando a média dos erros está próxima de zero e a variância desses erros está abaixo de um determinado valor referência.

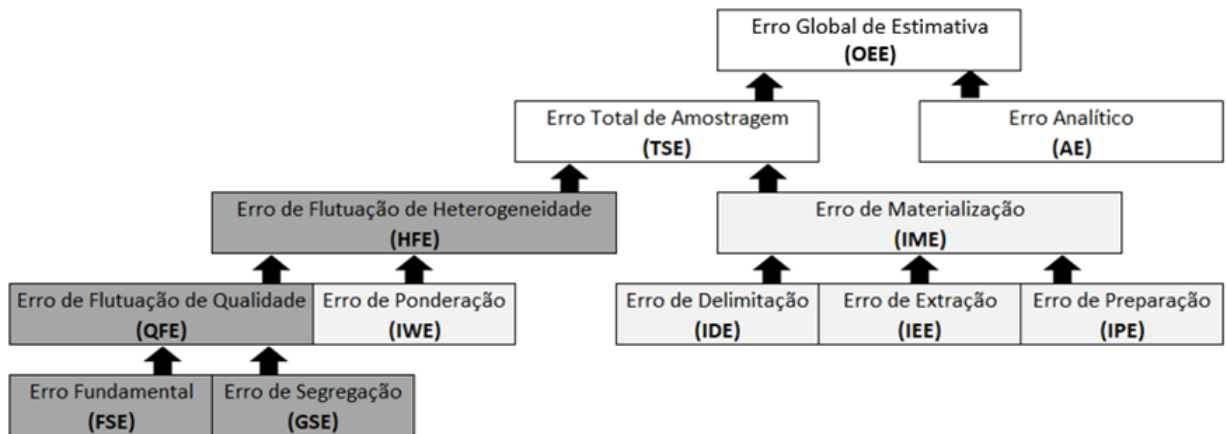
3.1.2 Os Erros de Amostragem

O processo de estimativa dos teores passa por basicamente três estágios principais, sendo eles: (1) a amostragem primária de um determinado lote, (2) a amostragem secundária ou preparação da amostra e (3) a análise química. Em cada estágio descrito há a geração de erros, que são caracterizados por sua variância e que, somados, resultam no erro global de estimativa (OEE).

Ao planejar um programa de amostragem, deve-se almejar a eliminação de todos os erros, ou pelo menos, a eliminação daqueles possíveis de eliminar, de tal forma que seja possível obter acurácia e precisão adequadas com mínimo custo (GRIGORIEFF, 2002).

A Figura 3 ilustra os componentes do erro global de estimativa, baseados na teoria da amostragem de Pierre Gy, mostrando em cinza claro os erros sistemáticos e os erros aleatórios em cinza escuro. Os erros sistemáticos são aqueles gerados por equipamentos e protocolos mal dimensionados e devem ser eliminados. Estes erros impactam o processo de estimativa, aumentando ou reduzindo a média dos valores estimados do lote (CHIEREGATI et al., 2007). Já os erros aleatórios estão diretamente ligados à heterogeneidade constitucional e devem ser conhecidos e minimizados.

Figura 3 - Representação dos componentes do erro global de estimativa



Fonte – (PITARD, 2010).

3.1.2.1 O erro fundamental de amostragem (FSE)

Quando uma amostra M_s é selecionada aleatoriamente, tendo todos os fragmentos a mesma probabilidade de coleta, a partir de um lote fragmentado M_L , surge um erro de amostragem entre o teor da amostra e o teor do lote. O erro fundamental de amostragem (FSE) é o menor erro para uma amostra selecionada em condições ideais e nunca pode ser igual a zero. Este erro tem média insignificante e é caracterizado por sua variância. A relação entre o FSE, o diâmetros da partícula – representado pelo d_{95} – e os fatores c , f , g e l definidos por Gy (GY, 1992), além da massa da amostra M_s e a massa do lote M_L , é representada pela seguinte equação, denominada “fórmula de Gy”:

$$s^2_{FSE} = c \cdot f \cdot g \cdot l \cdot d^3 \cdot \left(\frac{1}{M_s} - \frac{1}{M_L} \right) \quad (1)$$

A fórmula de Gy também permite o cálculo da massa mínima da amostra para uma variância relativa máxima permitida (PITARD, 2009).

3.1.2.2 O erro de segregação e agrupamento (GSE)

O erro fundamental de amostragem é o erro mínimo encontrado na amostragem, mas para que somente este erro aconteça, os fragmentos devem ser

selecionados de maneira probabilística, um a um, e na prática isto não acontece (FRANÇOIS-BONGARÇON; GY, 2002). Como alternativa, são coletados grupos aleatórios de fragmentos para composição da amostra e, neste caso, a reprodutibilidade passa a ser sensível ao processo e sofre o efeito da heterogeneidade de distribuição (CHIEREGATI; PITARD, 2018). Conseqüentemente, o erro de segregação de agrupamento (GSE), gerado pela heterogeneidade de distribuição, adiciona a componente gravitacional ao lote, realizando rearranjos entre as partículas e segregando famílias de fragmentos de acordo com sua constituição. Matematicamente, provou-se que essa componente é inversamente proporcional à quantidade de incrementos retirados para a composição da amostra. Se a amostra for composta por no mínimo 10 incrementos aleatórios, o GSE será menor ou igual ao erro fundamental de amostragem (PITARD, 1993). O GSE nunca será igual a zero, mas precisa ser conhecido e estimado. Segundo Pitard (1993), existem dois fatores responsáveis pelo GSE, que são descritos pela Equação 2:

$$s^2_{GSE} = Y \cdot Z \cdot s^2_{FSE} \quad (2)$$

- i. Fator de segregação, Z, que é uma medida dos rearranjos espaciais;
- ii. Fator de agrupamento, Y, que é uma medida da seletividade aleatória.

3.1.2.3 O erro de ponderação do incremento (IWE) e o erro de flutuação de qualidade (QFE)

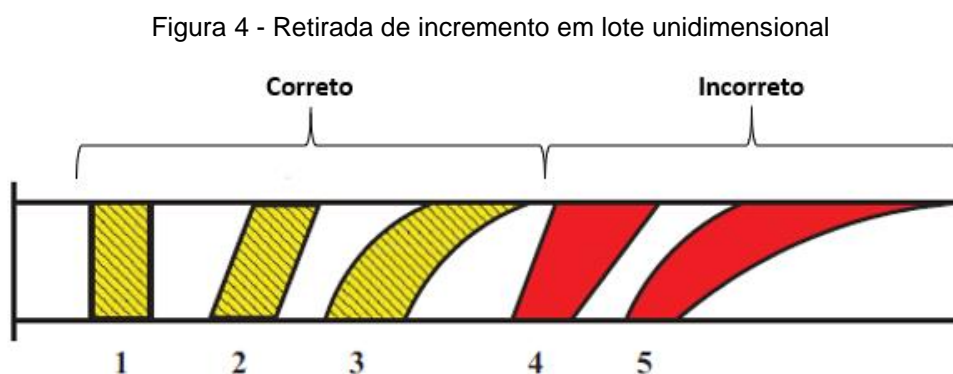
Amostradores em usinas de beneficiamento devem coletar alíquotas proporcionais ao fluxo naquele instante em que há a retirada do incremento. Um desvio excessivo na proporcionalidade leva a um enviesamento, que se traduz no erro de ponderação do incremento (IWE). Já o erro de flutuação da qualidade (QFE) é a soma do FSE e o GSE e, conseqüentemente, sofre influência da heterogeneidade do material, do fator de segregação e do fator de agrupamento.

3.1.2.4 O erro de flutuação de heterogeneidade (HFE)

Os equipamentos de amostragem na usina geralmente estão localizados em fluxos de polpa, transportadores de correia ou chutes de transferência, todos eles classificados como lotes unidimensionais, gerados por operações cronológicas. Quando esses incrementos são coletados em uma correia, em intervalos regulares de tempo, um erro unidimensional é introduzido e chamado de erro de flutuação de heterogeneidade (HFE). Esse erro depende da heterogeneidade do minério e da variabilidade das partículas ao longo do transportador, sendo definido como a diferença entre o teor real do lote e o teor da amostra retirada durante o intervalo de tempo considerado (GRIGORIEFF; COSTA; KOPPE, 2005). A variância do HFE, somada com a variância do IWE, corresponde ao erro total de amostragem (TSE) (CHIEREGATI et al., 2007).

3.1.2.5 O erro de materialização do incremento (IME)

O erro de materialização do incremento (IME) é composto pela soma das variâncias dos erros de delimitação do incremento (IDE), extração do incremento (IEE) e preparação do incremento (IPE). Estatisticamente, baseado na teoria da amostragem, a correta retirada do incremento para composição de uma amostra deve levar em consideração que todas as partículas tenham a mesma chance de serem amostradas. Desta maneira, a forma geométrica do incremento deve coincidir com o módulo isotrópico de observação que pode ser esférico, circular, ou em forma de fatia, conforme observado na Figura 4.



Fonte – Modificado de Pitard (2019).

Como resultado, a ação da gravidade e, conseqüente segregação, e qualquer desvio do módulo de observação ideal gera um enviesamento inconstante, contribuindo para a ocorrência do IDE.

À medida que o amostrador entra em contato com o material a ser amostrado, todo o material dentro do módulo isotrópico de observação, ou cada fragmento com seu centro de gravidade dentro desse módulo, deve ser amostrado, e vice-versa. Qualquer desvio desse comportamento geralmente resulta em uma perda ou ganho de massa do incremento. Novamente, por efeito da gravidade, combinado com um amostrador mal dimensionado e instalado, sem manutenção e constantemente sujo e obstruído, gera um viés caracterizado pelo IEE (PITARD, 2004).

Todas as etapas da preparação da amostra, como britagem, moagem, pesagem, pulverização, redução, secagem e manuseio, podem gerar contaminações, perdas e mudança das propriedades físicas do material. O erro gerado, normalmente acidental, é denominado de erro de preparação do incremento (IPE). Os erros sistemáticos, IDE, IEE e IPE, podem ser minimizados com equipamentos corretamente dimensionados para cada etapa do protocolo de amostragem (PITARD, 2004).

3.1.2.6 O erro total de amostragem (TSE)

O erro total de amostragem (TSE) é definido como a soma do erro de flutuação de heterogeneidade (HFE) com o erro de materialização do incremento (IME) gerado em cada estágio de amostragem (CHIEREGATI; PITARD, 2018).

$$TSE = HFE + IME \quad (3)$$

3.1.2.7 O erro analítico (AE)

O erro analítico (AE) não está incluído no erro total de amostragem (TSE), entretanto, sempre fará parte do erro global de estimativa (OEE). Ele é proveniente

das técnicas analíticas de estimativa de teores, e não inclui o erro da última etapa de redução de massa, na qual a amostra analítica é obtida.

3.1.2.8 O erro global de estimativa (OEE)

Tanto a amostragem quanto as etapas de análise são processos geradores de erro e, portanto, o erro global de estimativa (OEE) é a soma do erro total de amostragem (TSE) com o erro analítico (AE) (CHIEREGATI; PITARD, 2018).

$$OEE = TSE + AE \quad (4)$$

São inúmeras as fontes de erro e, portanto, a fórmula acima pode ser reescrita em função de cada componente de erro:

$$OEE = AE + \sum_{n=1}^N (FSE_n + GSE_n + HFE_n + IDE_n + IEE_n + IPE_n) \quad (5)$$

onde N é o número de estágios de amostragem do protocolo.

3.1.3 A Amostragem em Circuitos Industriais

Em circuitos industriais, na maioria das vezes, a amostragem é feita em fluxos unidimensionais, em forma de minério particulado ou polpa. São utilizados um dos dois processos probabilísticos abaixo para amostrar fluxos desse tipo:

1. O processo incremental, em que o material a ser amostrado compõe um fluxo unidimensional e um amostrador corta-fluxo coleta um certo número de incrementos desse fluxo para composição da amostra. Divisores rotativos são um exemplo desse processo.
2. O processo de divisão, em que o material é dividido em várias partes, e uma ou mais dessas partes são selecionadas de forma aleatória para composição da amostra.

Em usinas de beneficiamento, geralmente é realizada a amostragem incremental ao longo ou ao final de transportadores de correia, ou nas descargas de tubulações. Este processo de amostragem pode ser dividido em uma sequência lógica de quatro passos elementares e independentes (PITARD, 2019):

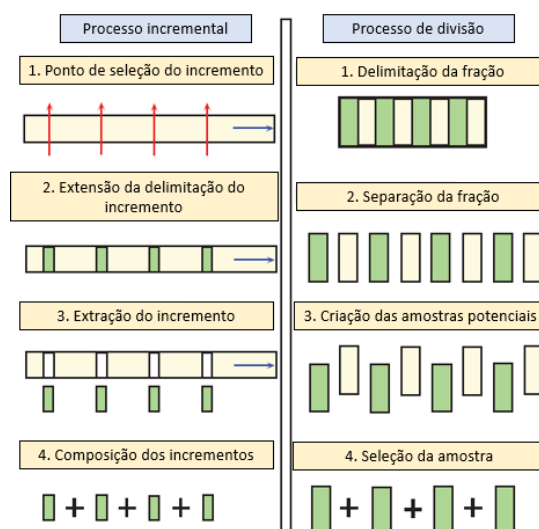
1. Escolha do ponto de seleção do incremento;
2. Delimitação do incremento;
3. Extração do incremento;
4. Composição dos incrementos.

Já a amostragem por divisão é mais comum nos processos de divisão secundária, tendo como exemplo: divisão por pilha cônica ou quadrantes, divisão alternada ou fracionada, divisão por rifles, entre outros. O processo de divisão se assemelha ao incremental pois também se baseia em quatro passos elementares e independentes:

1. Delimitação das frações;
2. Separação das frações;
3. Geração das amostras potenciais;
4. Seleção da amostra.

A Figura 5 mostra o comparativo entre esses dois processos de amostragem.

Figura 5 - Comparativo entre os processos incremental e de divisão



Fonte - (PITARD, 2019).

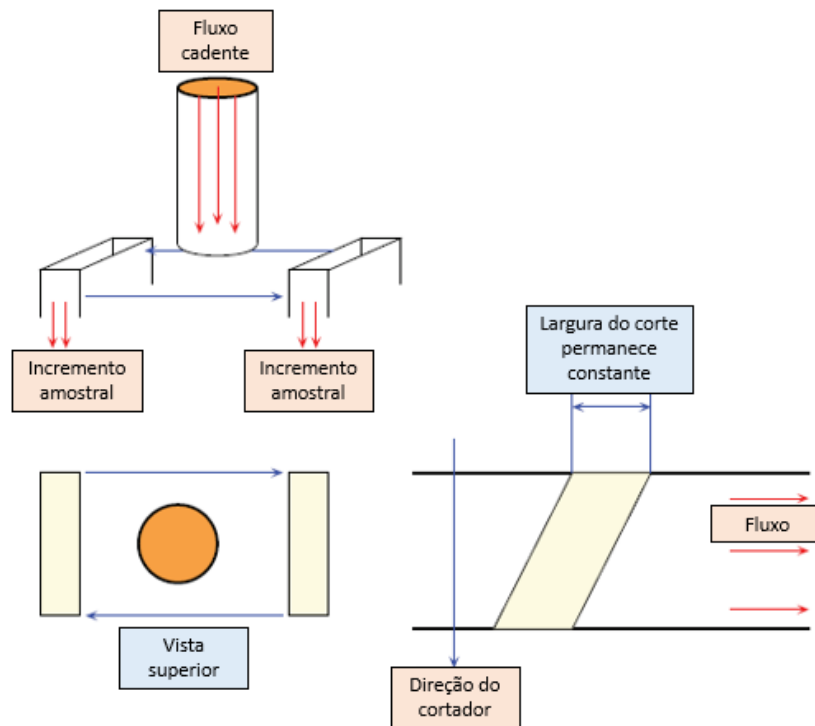
Os amostradores em circuitos industriais geralmente são do tipo corta-fluxo e devem amostrar o fluxo em sua totalidade por uma determinada fração de tempo, de modo que a seleção do incremento seja correta. Segundo Pitard (2019), existem disponíveis no mercado diversos dispositivos que não são válidos pela teoria da amostragem, não garantindo equiprobabilidade para que todas as partículas do lote tenham chances de serem amostradas. Amostradores tais como de tubulação com coletores fixos, amostradores intrusivos de tubulação, amostradores tipo *cross-belt*, amostradores desvia-fluxo, entre outros, não serão discutidos na presente revisão. Os amostradores válidos e de dimensionamento correto mais comuns na amostragem industrial são:

- Amostradores lineares corta-fluxo;
- Amostradores rotativos corta-fluxo;
- Amostradores rotativos sobre cone;
- Amostradores rotativos setoriais.

3.1.3.1 Amostradores lineares corta-fluxo

São também conhecidos como “lineares”, “vai e vem” ou “corta-fluxo”. São instalados na descarga de transportadores de correia ou tubulações de polpa e realizam o corte transversal na direção perpendicular por todo o fluxo, fazendo a retirada do incremento (Figura 6). Pode ser customizado com diferentes ângulos ou instalado em diferentes inclinações do fluxo, desde que garanta uma correta delimitação do incremento amostrado.

Figura 6 - Amostrador linear corta-fluxo interceptando um fluxo cadente



Fonte - (PITARD, 2019).

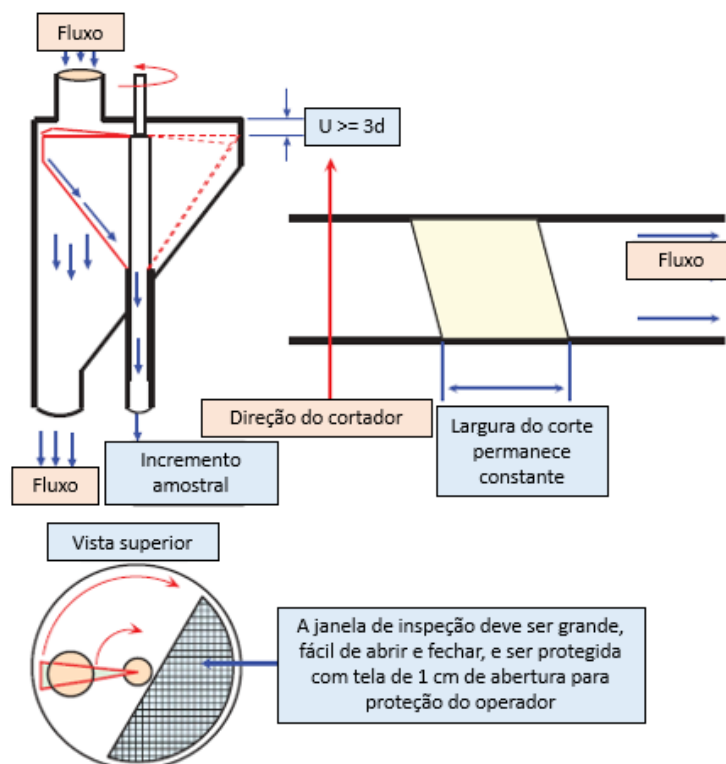
3.1.3.2 Amostradores rotativos corta-fluxo

Geralmente chamado de “*Vezein*”, esse tipo de amostrador é utilizado como secundário, sendo dimensionado para material partícula do abaixo de 15 mm e polpas de minério. Para correta delimitação do fluxo o amostrador deve ter um formato radial, respeitando o centro de rotação (Figura 7). Esse equipamento tornou-se bastante popular ao longo dos anos devido seu princípio de funcionamento simples e variadas qualidades:

- São compactos e precisam de pouco espaço para serem instalados;
- São resistentes e de vida útil considerável;
- São de fácil manutenção e limpeza;
- Se bem dimensionados e instalados, são muito acurados;
- Não são caros;
- Fornecem incrementos perfeitamente proporcionais em fluxo contínuo.

Em contrapartida, algumas desvantagens também são percebidas. É necessário um grande espaço vertical para serem instalados de forma satisfatória e respeitando o mínimo de 60° de inclinação para o amostrador. São equipamento de baixa capacidade, sendo utilizados para fluxos pequenos.

Figura 7 - Amostrador rotativo corta-fluxo interceptando um fluxo cadente



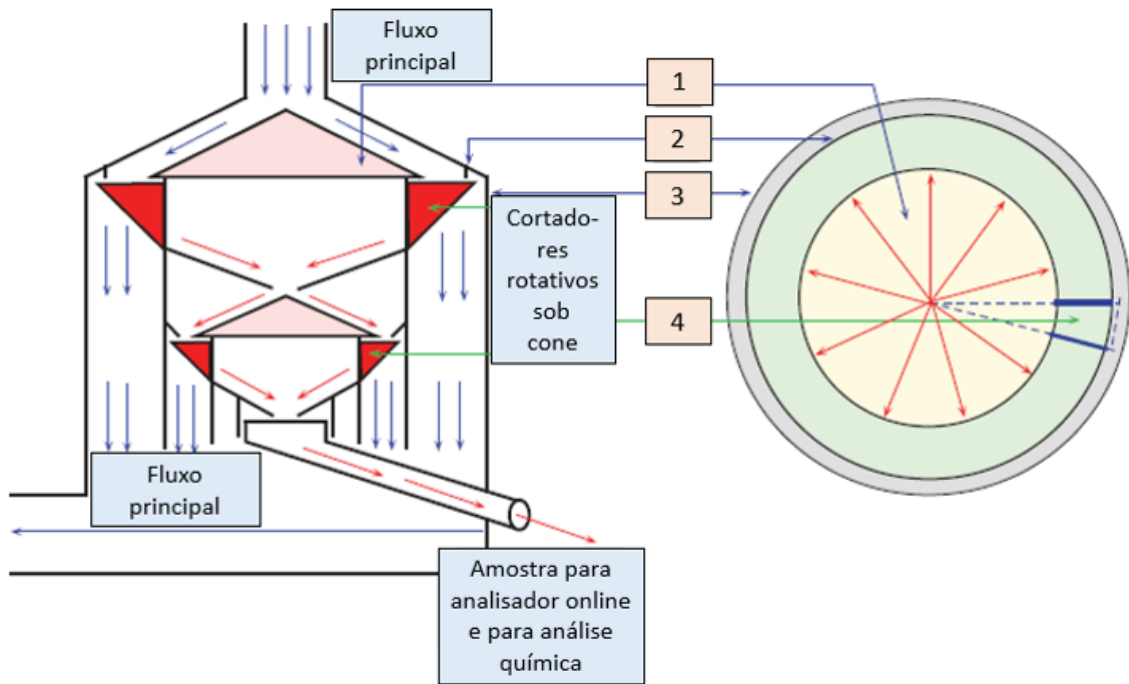
Fonte - (PITARD, 2019).

3.1.3.3 Amostradores rotativos sob cone

Amostradores rotativos montados sob cone são uma concepção antiga, remontada aos primeiros estudos da teoria da amostragem (GY, 1971). É composto por um cone, ou conjunto de cones, com amostrador rotativo radial, respeitando o centro de rotação, amostrando todo o fluxo cadente (Figura 8). As vantagens desse amostrador são notórias no que diz respeito à mitigação dos principais componentes do erro de amostragem. O sistema é perfeitamente proporcional, mitigando o IWE e provendo uma redundância para cheque dos medidores de massa e fluxo da usina, o sistema amostra o fluxo principal continuamente tornando HFE desprezível, tem capacidade de reduzir muito a massa da amostra durante a amostragem, compacto e

simples, o cone propicia o amortecimento do fluxo distribuindo a amostra de forma suave e aumentando as chances de um corte bem feito, o amostrador gira lentamente em torno da base do cone, garantindo vida longa aos componentes mecânicos e corte representativo, manutenção fácil e simples.

Figura 8 - Amostrador rotativo sob cone interceptando um fluxo cadente

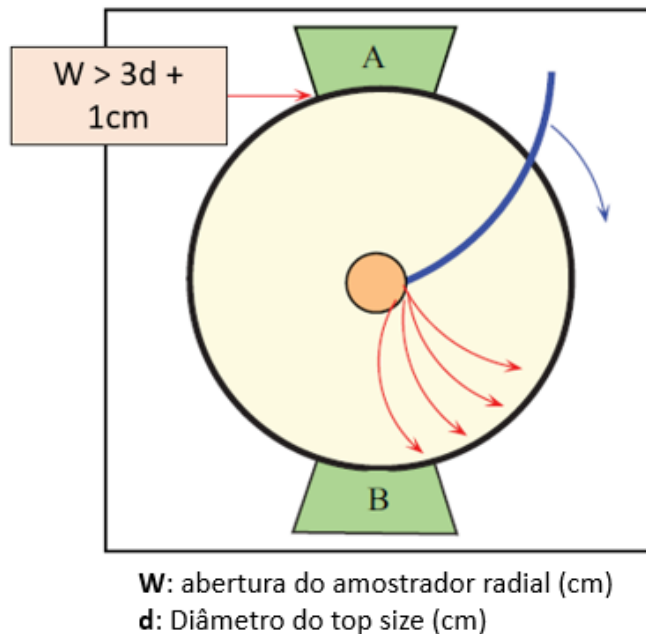


Fonte - (PITARD, 2019).

3.1.3.4 Amostradores rotativos setoriais

O sistema de amostragem mostrado na Figura 9 consiste em uma mesa circular estacionária em cujo centro o fluxo a ser amostrado é continuamente descarregado. Um raspador em formato de arco gira lentamente na superfície da mesa empurrando o material em direção à borda da mesa sob a qual os amostradores radiais foram instalados. O sistema é considerado correto desde que os amostradores sejam radiais e todo o material na mesa encontre seu caminho até a borda.

Figura 9 - Amostrador rotativo setorial



Fonte - (PITARD, 2019).

3.1.4 O IEE nos Equipamentos de Amostragem

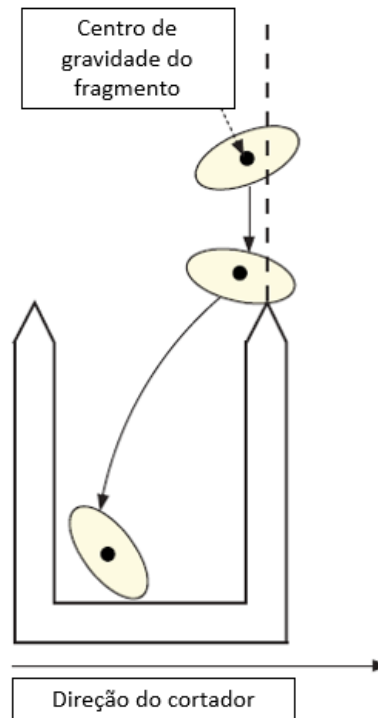
A extração do incremento pelos equipamentos de amostragem somente é correta se ocorrer a retirada total do volume delimitado pela forma geométrica coincidente com o módulo isotrópico de observação. Todos os fragmentos que têm seu centro de gravidade dentro dessa região devem pertencer à amostra, e os fragmentos com centro de gravidade fora dessa região não devem ser coletados. Já os fragmentos que estão posicionados coincidentemente na região de delimitação são ricocheteados pela face do amostrador, tornando-se um dos principais problemas para o processo de amostragem. Podem-se definir três grupos de fragmentos:

- Fragmentos que passam pelo amostrador, fora da região de delimitação;
- Fragmentos que entram diretamente no amostrador;
- Fragmentos que ricocheteiam na face do amostrador.

A reta que delimita o incremento não segue o formato dos fragmentos do lote, criando o efeito do ricochetear dos fragmentos pelas facas do amostrador, que devem ser direcionados segundo o posicionamento do seu centro de gravidade (Figura 10).

Qualquer desvio dessa regra do ricochetear se traduz no erro de extração do incremento (IEE).

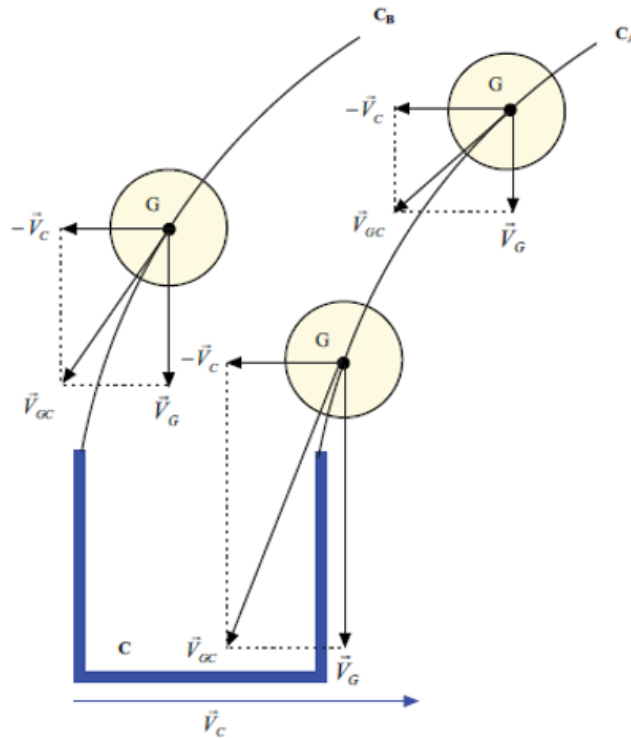
Figura 10 – Ricochetear do fragmento pela face do amostrador



Fonte - (PITARD, 2019).

Para melhor entendimento desse efeito, a Figura 11 ilustra uma seção vertical de um típico fragmento em um fluxo cadente e um amostrador C , representado em um determinado instante da extração do incremento. A figura também mostra duas curvas parabólicas C_a e C_b , que podem ser sobrepostas por um movimento de translação paralelo à direção do amostrador. Essas curvas são a representação da composição dos vetores \vec{V}_{GC} aplicado ao centro de gravidade G de um fragmento F . Todos os estudos referentes à teoria da amostragem para análise do IEE foram observados simulando partículas esféricas perfeitas (PITARD, 2019). A figura mostra o efeito de ambas as regras do ricochetear e centro de gravidade.

Figura 11 - Componentes do movimento atuantes no fragmento na coleta do incremento



Fonte - (PITARD, 2019).

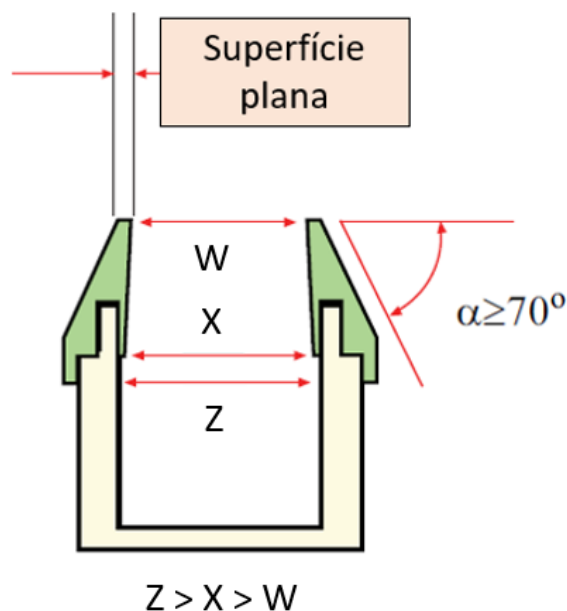
Para a correta extração do incremento, o correto dimensionamento do amostrador deve levar em consideração alguns aspectos de engenharia:

- A retidão da face do amostrador;
- A espessura do topo da face do amostrador;
- A forma e ângulo da face do amostrador;
- O comprimento do amostrador;
- O ângulo da calha do amostrador;
- A abertura das facas do amostrador;
- A velocidade do amostrador;
- A profundidade, capacidade e projeto do amostrador;
- A velocidade do fluxo que passa pelo amostrador.

No geral, as facas do amostrador devem seguir algumas regras importantes (PITARD, 2019):

- As facas do amostrador devem ser feitas de aço inoxidável de qualidade superior para não se danificarem rapidamente;
- As facas do amostrador devem ter apenas uma posição possível, devem ser simétricas em relação ao raio do movimento de rotação e não ser ajustáveis;
- A inclinação do ângulo das facas do amostrador deve ser de pelo menos 70°, valor também recomendado para o ângulo de escoamento do incremento no interior do amostrador;
- O topo das facas pode ter uma pequena espessura plana. Seu tamanho depende do material a ser amostrado e varia com cada aplicação. Pode variar de 2 cm para amostragem de concentrado de minério de ferro no carregamento de navios, até 0,05 cm para amostradores secundários rotativos tipo *Vezin*. Para materiais pegajosos, não deve haver nenhuma parte plana;
- Não deve haver absolutamente nenhuma restrição no espaço disponível dentro do amostrador, para que nenhum fragmento coletado possa sair; então $Z > X > W$ (Figura 12).

Figura 12 - Projeto correto das facas do amostrador

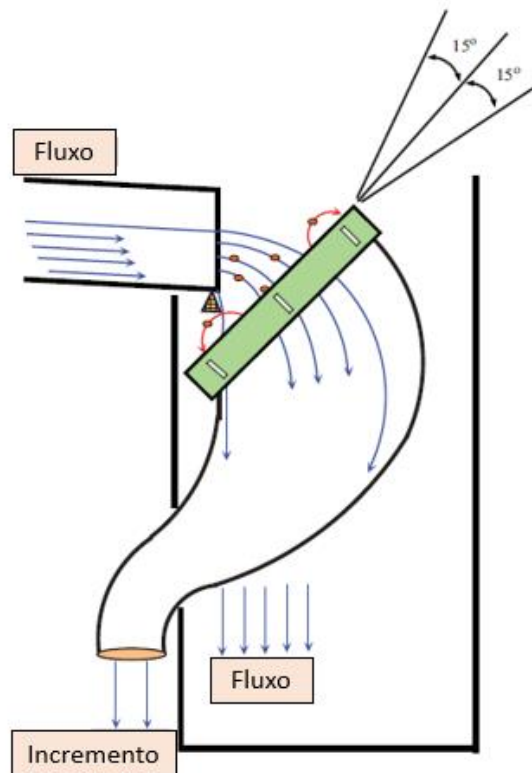


Fonte - (PITARD, 2019).

O comprimento do amostrador deve ser suficiente para coletar as partículas que têm seu centro de gravidade dentro da zona de delimitação do incremento e que sofrem o efeito de ricochetear nos amostradores. Recomenda-se que o comprimento

do amostrador seja de 2 a 3 vezes a espessura do fluxo a ser amostrado (PITARD, 2019). Já a inclinação do amostrador deve ser sempre perpendicular ao fluxo a ser amostrado, com limitação de 15° para mais ou para menos (Figura 13). O amostrador nunca deve ser instalado na posição vertical, de forma a mitigar tanto IDE como IEE.

Figura 13 - Dimensionamento correto de um amostrador inclinado



Fonte - (PITARD, 2019).

Para a correta extração do incremento, Pierre Gy propôs, baseado em alguns de seus experimentos, três regras que definem a velocidade e a abertura das facas do amostrador, em que W é a abertura das facas do amostrador, W_0 é a abertura mínima das facas do amostrador, d é a abertura da malha em que passam 95% do material (*top size*):

1. Primeira regra (abertura das facas do amostrador)

Para materiais com *top size* $\geq 0,3$ cm:

$$W \geq W_0 = 3d \quad (6)$$

Para materiais com *top size* < 0,3 cm:

$$W \geq W_0 = 1cm \quad (7)$$

2. Segunda regra (velocidade do amostrador)

Para todos os diâmetros d , com $W = nW_0$, $n \geq 1$ e V_0 sendo definido como a máxima velocidade do amostrador, tem-se:

$$V_c \leq V_0 = (1 + n) * 30cm/s \quad (8)$$

3. Terceira regra (velocidade máxima do amostrador):

A velocidade máxima do amostrador é definida por:

$$W = W_0 \quad (9)$$

$$V_c = V_0 = 60cm/s \quad (10)$$

A velocidade do fluxo também influencia a correta extração do incremento. A velocidade recomendada para amostragem de polpa em tubulação é de no máximo 2 m/s (PITARD, 2019). Velocidades até 3 m/s necessitam utilização de fatores de projeto maiores para garantir uma boa extração. Já para fluxos acima de 3 m/s, é necessário um trabalho de engenharia para redimensionamento do fluxo reduzindo a velocidade. A capacidade dos coletores deve atender de forma satisfatória o fluxo, geralmente com coletores operando no máximo a 2/3 de sua capacidade máxima. Para fluxos particulados, Pitard (2019) cita que se deve dimensionar a abertura das facas do amostrador de forma crescente, conforme indicações abaixo, em que W_0 é a abertura das facas do amostrador e d é o maior tamanho de partícula.

- Vazões entre 500 e 2.500 t/h: $W_0 = 4d$;
- Vazões entre 2.500 e 5.000 t/h: $W_0 = 5d$;
- Vazões entre 5.000 e 8.000 t/h: $W_0 = 6d$;
- Vazões acima de 8.000 t/h: $W_0 = 6d$ provavelmente será suficiente desde que a velocidade do fluxo não ultrapasse 3 m/s.

3.2 O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

A simulação de elementos discretos é uma ferramenta computacional numérica que descreve o comportamento mecânico para uma grande quantidade de partículas, envolvendo a resolução de uma série de equações de movimento. O método é baseado na resolução de algoritmos numéricos em que são monitorados os contatos entre partículas e o movimento dessas partículas modeladas a partir dos resultados da integração das equações diferenciais ordinárias. Conceitos iniciais foram desenvolvidos a partir do campo da mecânica de rochas em meados dos anos 70, para estudos relacionados ao movimento dos maciços rochosos (CUNDALL; STRACK, 1979). Inicialmente limitado a poucas partículas restritas a um ambiente bidimensional, o método se desenvolveu rapidamente com o avanço tecnológico na segunda metade do século 20, refletindo em trabalhos com grandes números de partículas em um ambiente tridimensional.

Estudos recentes abrangem um grande leque de aplicações que se baseiam no desenvolvimento de simulações para dimensionamento de chutes de transferência (ILIC, 2019), silos (SHEN; ROBERTS; WHEELER, 2021), alimentadores (PATINGE; PRASAD, 2017), sistemas de amostragem (CLEARY et al., 2008; CLEARY; ROBINSON, 2008, 2011a, 2011b; CLEARY; ROBINSON; SINNOTT, 2005; ROBINSON; SINNOTT, 2011), homogeneizadores e misturadores (ILIC; LAVRINEC; OROZOVIC, 2020), transportadores de correia (DALLINGER; HUBLER, 2017), peneiras de rolos (SILVA et al., 2018), entre outras aplicações.

A simulação funciona com base em um esquema numérico que analisa o movimento e as interações de partículas rígidas independentes. O algoritmo calcula a posição de cada partícula individualmente, pela resultante entre as forças normal e tangencial no momento do contato, em cada passo de tempo, baseado no modelo de contato previamente definido. É um processo cíclico que se repete a cada passo de tempo definido na simulação.

O ciclo de cálculo usado pelo método alterna por um lado a aplicação da Segunda Lei de Newton, que dá o movimento da partícula a partir das forças atuantes e, por outro lado, a Lei de Força-Deslocamento, usada nos contatos entre entidades para encontrar as forças de contato em cada deformação. O método não modela a deformação da partícula, ao invés disso, permite uma sobreposição entre as partículas nos pontos de contato (CUNDALL; STRACK, 1979).

A equação 11 e equação 12, mostram as fórmulas para cálculo do movimento da partícula em termos de translação e rotação respectivamente:

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} \vec{x}_i = \sum_{i=1}^n F_i + m_i g \quad (11)$$

$$I_i \frac{d}{dt} \vec{\omega}_i = \sum_{i=1}^n T_i \quad (12)$$

Onde m_i , \vec{x}_i , I_i , e $\vec{\omega}_i$ são, respectivamente, a massa, vetor posição, o momento de inércia e a velocidade angular da partícula, $\sum_{i=1}^n F_i$ corresponde à soma das forças devido às interações entre as partículas ou outras geometrias do sistema, $\sum_{i=1}^n T_i$ é a soma dos torques resultante das forças tangenciais no contato e g é a aceleração da gravidade.

3.2.1 Modelos de Contato e Adesão no DEM

O cálculo das forças de contato proveniente do choque entre as partículas está diretamente relacionado com o modelo de contato usado. Existem diferentes modelos de contato que explicam a interação entre as partículas e a interação entre outros elementos do sistema. Os modelos mais utilizados são os modelos de Hertz-Mindlin para cálculo das força normal e tangencial (HERTZ, 1881; MINDLIN, 1949; MINDLIN; DERESIEWICZ, 1953), o modelo de histerese linear (WALTON; BRAUN, 1986) para cálculo da componente normal e o modelo de atrito de Coulomb para cálculo da componente tangencial, esses dois últimos são utilizados como padrão pelo Rocky DEM, um dos *softwares* mais utilizados para simulação. É importante ressaltar que a comparação entre os modelos de contato não faz parte desse estudo. Todas as

simulações foram realizadas no *software* Rocky DEM, e, portanto, maior atenção será dada ao modelo de histerese linear e ao modelo de atrito de Coulomb.

O modelo de contato normal elasto-plástico é apropriado para simular materiais granulares secos e não adesivos. Infelizmente, muitas vezes os materiais granulares podem ter vários teores de umidade que podem fazer com que eles adiram entre si e a outras superfícies com as quais entram em contato (ROCKY DEM, 2020). A fim de capturar esse comportamento, a força normal repulsiva deve ser complementada pela força normal atrativa para prever com precisão as características do fluxo. Adicionalmente, devido ao comportamento coesivo característico do material, utilizou-se o modelo de adesão constante, que leva em consideração a distância entre as partículas e a massa das partículas em contato para cálculo da força de atração. Esse modelo será mais bem detalhado neste estudo.

3.2.1.1 Modelo de histerese linear

É um modelo de contato de deformação elasto-plástico (repulsivo e dissipativo) para o cálculo da força normal de contato. Neste modelo, as partículas exibem comportamento elástico até um esforço crítico dado, a partir da qual começam a apresentar deformação plástica (ROCKY DEM, 2020). Visto que a força normal não apresenta nenhum termo de amortecimento, a dissipação de energia não depende da velocidade relativa das partículas vizinhas, fazendo com que a dissipação de energia seja indiferente aos outros contatos do sistema. Este modelo tem uma vantagem adicional em comparação com os modelos meramente elásticos (ex: Hertz-Mindlin), que, no momento do descarregamento, a força vai até zero, mas deixando uma sobreposição residual que representa a deformação plástica. O modelo de histerese linear é implementado de forma incremental no Rocky DEM, conforme descrito pelas equações a seguir:

$$F_n^t = \begin{cases} \min (K_{nl}s_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n) & \text{se } \Delta s_n \geq 0 \\ \text{máx} (F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n, \lambda K_{nl}s_n^t) & \text{se } \Delta s_n < 0 \end{cases} \quad (13)$$

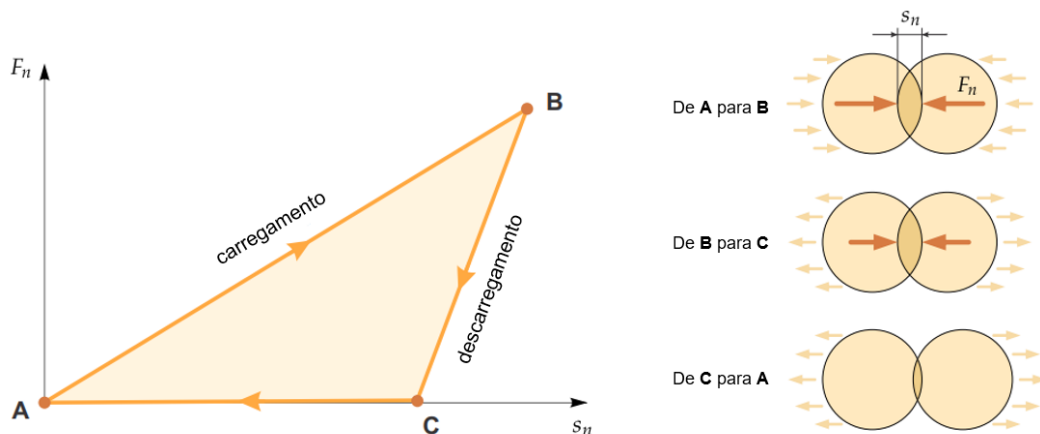
$$\Delta s_n = s_n^t - s_n^{t-\Delta t} \quad (14)$$

Onde:

- F_n^t e $F_n^{t-\Delta t}$ são as forças normais de contato elasto-plástica no momento t e no momento anterior $t - \Delta t$, respectivamente, onde Δt é o passo de tempo;
- Δs_n é a mudança na sobreposição normal do contato durante o tempo. Assume-se que é positivo quando as partículas se aproximam e negativo quando se separam. s_n^t e $s_n^{t-\Delta t}$ são os valores das sobreposições normais no tempo corrente e anterior, respectivamente;
- K_{nl} e K_{nu} são, respectivamente, os valores da rigidez de carregamento e descarregamento no contato;
- λ é uma constante adimensional. Tem valor padrão no Rocky DEM de 0,001. Essa constante limita a rigidez de descarregamento, assegurando-se assim que a força permaneça em zero na sobreposição zero.

Um ciclo típico de carregamento/descarregamento é demonstrado na Figura 14. Entre os pontos A e B tem-se o processo de carregamento, no qual a sobreposição de forças normais aumenta linearmente com a inclinação K_{nl} . Após atingir a sobreposição máxima, a descarga segue uma linha mais inclinada entre os pontos B e C, na qual a inclinação é K_{nu} . A deformação plástica para o contato só existe durante o contato, então qualquer deformação residual é esquecida após o contato cessar. A energia dissipada na colisão é numericamente igual à área sombreada no diagrama força-deformação da Figura 14.

Figura 14 – Esquema ilustrativo da sobreposição normal entre duas partículas para o modelo de histerese linear



Fonte - (ROCKY DEM, 2020).

O cálculo das rigidezes de carregamento e descarregamento são definidas pelo tamanho da partícula, pelo módulo elástico (módulo de Young) e pelo coeficiente de restituição dos materiais em contato. O coeficiente de restituição ε no Rocky é uma medida de dissipação de energia para os materiais em contato. Para o contato de duas partículas, ou de uma partícula com outro elemento do sistema, as rigidezes equivalentes ao carregamento e descarregamento são definidas, respectivamente, como:

$$\frac{1}{k_{nl}} = \begin{cases} \frac{1}{k_{nl,p_1}} + \frac{1}{k_{nl,p_2}} & \text{contato entre partículas} \\ \frac{1}{k_{nl,p}} + \frac{1}{k_{nl,b}} & \text{contato entre partícula-elemento do sistema} \end{cases} \quad (15)$$

$$k_{nu} = \frac{k_{nl}}{\varepsilon^2} \quad (16)$$

Onde p_1 e p_2 se referem às partículas 1 e 2 envolvidas no contato e b se refere ao outro elemento do sistema que também pode ser envolvido no contato com uma partícula. A rigidez individual associada a cada partícula e a outro elemento do sistema são obtidas pela equação 17 e 18, respectivamente.

$$k_{nl,p} = E_p L \quad (17)$$

$$k_{nl,b} = E_b L \quad (18)$$

Onde:

- E_p e E_b são os módulos elásticos (módulo de Young) da partícula e do outro elemento do sistema;
- L é o tamanho da partícula.

3.2.1.2 Modelo de atrito de Coulomb

A força tangencial nesse modelo é do tipo elástico-friccional (ROCKY DEM, 2020). Se a força tangencial é considerada puramente elástica, seu valor no tempo t pode ser dado por:

$$F_{\tau,e}^t = F_{\tau}^{t-\Delta t} + K_{\tau}\Delta s_{\tau} \quad (19)$$

Onde:

- $F_{\tau}^{t-\Delta t}$ é a força tangencial no tempo anterior;
- Δs_{τ} é o deslocamento tangencial relativo das partículas durante o passo de tempo;
- K_{τ} é a rigidez tangencial definida como:

$$K_{\tau} = r_K k_{nl} \quad (20)$$

Onde k_{nl} é a rigidez de carregamento e r_K é a razão de rigidez tangencial.

Nesse modelo, entretanto, a força tangencial não poderá exceder o limite de Coulomb. Assim sendo, a equação completa é apresentada abaixo:

$$F_{\tau}^t = \min (|F_{\tau,e}^t|, \mu F_n^t) \frac{F_{\tau,e}^t}{|F_{\tau,e}^t|} \quad (21)$$

Onde:

- F_n^t é a força normal de contato no tempo t ;
- μ é o coeficiente de atrito.

O coeficiente de atrito pode ser estático (μ_s) ou dinâmico (μ_d). O atrito estático é observado quando ainda não existe movimento sobre a partícula. O atrito dinâmico é observado durante o movimento da partícula, exercendo força contrária ao movimento. O movimento é considerado quando a força tangencial $F_{\tau,e}^t$ supera o limite $\mu_s F_n^t$. Uma vez que essa força diminui, atingindo novamente $\mu_s F_n^t$, o movimento se exaure.

3.2.1.3 Modelo de adesão constante

O modelo de adesão constante é um dos mais simples implantado no *software* Rocky DEM. Pode ser usado para simular com bastante acurácia o comportamento de materiais adesivos no sistema. A Equação 22, descreve o modelo.

$$F_{n,adh} = \begin{cases} 0 & \text{se } -s_n \geq \delta_{adh} \\ f_{adh} g \min(m_1, m_2) & \text{se } -s_n < \delta_{adh} \end{cases} \quad (22)$$

Onde:

- $F_{n,adh}$ é a força normal de adesão no contato;
- s_n é a sobreposição normal no contato;
- m_1 e m_2 são as massas das partículas em contato;
- g é a aceleração gravitacional;
- δ_{adh} é a distância de adesão. É um parâmetro dependente das características do material. Se a distância entre duas partículas ou distância da partícula a algum outro elemento do sistema é maior do que δ_{adh} , a força de adesão atuará.
- f_{adh} é a fração da força gravitacional aplicada. O valor da força de adesão será o resultado da força gravitacional da partícula, multiplicado pelo valor de f_{adh} .

3.2.2 Calibração e Caracterização dos Materiais Particulados

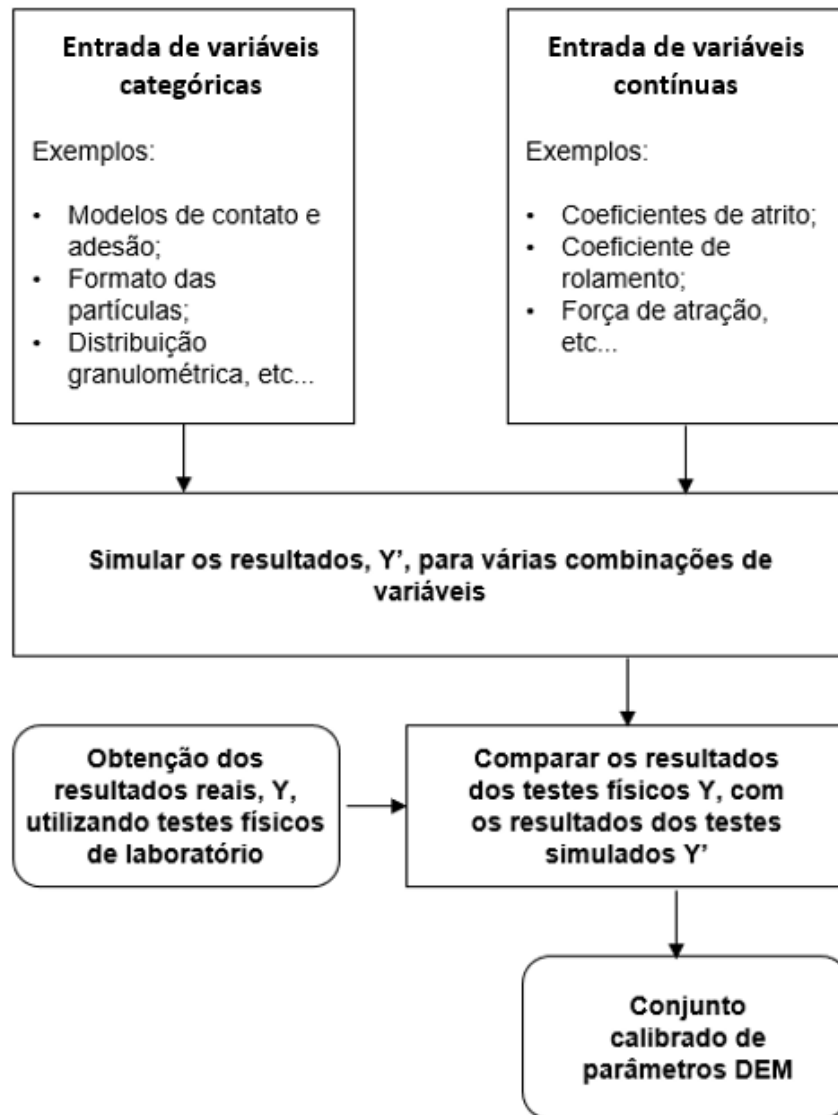
As propriedades físicas dos materiais particulados comumente estudados têm um caráter macroscópico e incluem: densidade aparente, ângulo de repouso, ângulo de atrito interno, distribuição granulométrica, entre outros, todos os quais podem ser medidos diretamente em laboratório. Essas propriedades permitem a caracterização com base na natureza da amostra. Entretanto, as propriedades do material simuladas em DEM são definidas pelo modelo de contato utilizado e são de natureza microscópica. Elas incluem: módulo de Young, coeficiente de restituição, coeficientes de atrito, coeficiente de rolamento, força de atração, densidade real das partículas,

entre outras. Devido à natureza das propriedades microscópicas, torna-se difícil e impraticável a medição direta desses parâmetros (com exceção da densidade real das partículas). Assim sendo, é necessária a realização de testes específicos para calibração desses parâmetros.

A calibração para a simulação de elementos discretos se resume na obtenção de um conjunto de parâmetros simulados que representem o comportamento do material nos testes de laboratório realizados para a calibração (GRIMA; WYPYCH, 2011; MOHAJERI; VAN RHEE; SCHOTT, 2021). Usualmente, são utilizadas técnicas e regras de calibração padronizadas para uma modelagem eficiente das simulações. O próprio teste de calibração deve se assemelhar ao fluxo simulado de forma a representar a tarefa real aplicada. Assim, diferentes testes podem ser necessários para diferentes finalidades.

Em geral, a calibração é realizada pela comparação entre experimentos reais (geralmente em escala laboratorial) e experimentos simulados, na escala 1:1. Os parâmetros de simulação são testados por “tentativa e erro”, por uma variação sistemática, abrangendo campos específicos para cada parâmetro (ROESSLER; KATTERFELD, 2018; WENSRICH; KATTERFELD, 2012), ou, mais recentemente, por simulações controladas por um algoritmo de otimização (BENVENUTI; KLOSS; PIRKER, 2016; DO; ARAGÓN; SCHOTT, 2018; RACKL; HANLEY, 2017). No geral, a calibração DEM é realizada seguindo o procedimento genérico descrito na Figura 15.

Figura 15 - Componentes principais de um procedimento genérico de calibração DEM



Fonte – Modificado de Mohajeri et al. (2021).

Dentre os parâmetros de contato que caracterizam a interação de diferentes materiais, pode-se destacar os coeficientes de atrito, o coeficiente de rolamento e o coeficiente de restituição. Os coeficientes de atrito são propriedades empíricas que caracterizam o contato entre diferentes tipos de superfície de materiais e são utilizados para calcular a força de atrito resultante da interação entre elementos. O atrito expressa a força de resistência ao movimento de escorregar entre duas superfícies. O coeficiente de rolamento caracteriza o formato de dois corpos em contato (ROCKY DEM, 2020). Essa grandeza é utilizada para calcular o atrito de rolamento, o qual expressa a força de resistência ao movimento de rolamento entre duas superfícies, na ausência de movimento escorregadio. Já o coeficiente de restituição indica a

quantidade de energia cinética dissipada no choque de uma partícula contra uma superfície.

Os coeficientes de atrito (estático e dinâmico) e o coeficiente de rolamento são os fatores que mais influenciam o comportamento macroscópico dos materiais particulados nas simulações DEM (WENSRICH; KATTERFELD, 2012). Quando se realiza a calibração de materiais particulados coesivos alguns testes individuais de laboratório são utilizados como referência para a calibração. A principal resposta desses testes são as medidas dos diferentes ângulos formados pelo material em diferentes aparatos (ROESSLER et al., 2019). Especificamente neste trabalho, os experimentos foram voltados para a determinação do ângulo de repouso e do ângulo de atrito interno do material.

A determinação do ângulo de repouso de materiais particulados garante diversas discussões em torno do tema e é extensivamente utilizado em DEM. O ângulo de repouso é o ângulo formado pela descarga gravitacional do material, medida em relação ao plano horizontal (ROBERTS, 1998). O ângulo de repouso também pode ser definido como o ângulo (na horizontal) em que o material se apresenta quando empilhado ou descarregado de forma natural e se relaciona com o ângulo de atrito interno para materiais particulados (CARRIGY, 1970). O ângulo de atrito interno é o ângulo crítico de repouso, ou o ângulo de escoamento inicial, proveniente do escoamento livre do material por si próprio, também obtido em relação ao plano horizontal.

A coesão está diretamente ligada à umidade do material e à presença de partículas finas. As partículas finas atuam como agente ligante entre as partículas grossas, aumentando as forças de atração entre elas e aumentando a resistência interna do material granular, exibindo maior coesão (ILIC, 2013). Para o procedimento de calibração, existe uma infinidade de combinações de variáveis que podem representar o resultado de um único teste. Assim sendo, recomenda-se que a calibração das variáveis seja realizada em diferentes testes que expliquem diferentes características físicas do material (ROESSLER et al., 2019).

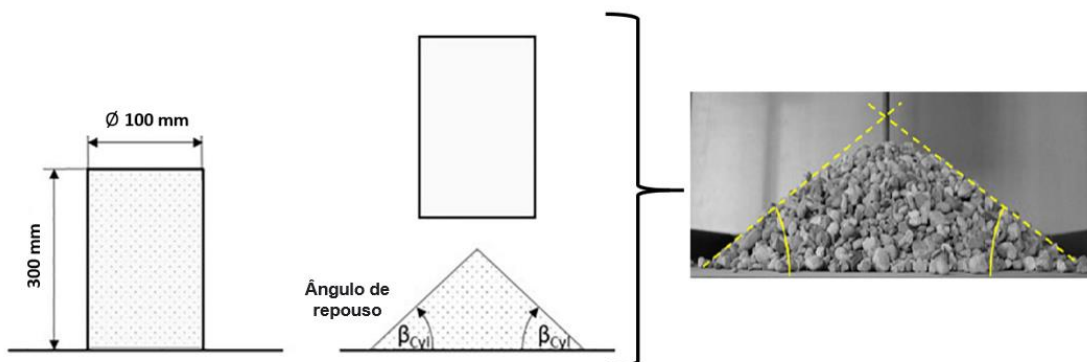
3.2.2.1 Testes laboratoriais

Diversos testes podem ser propostos para calibração dos parâmetros DEM para várias aplicações. No presente tópico, são detalhados os testes para determinação do ângulo de repouso e do ângulo de atrito interno do material que forneceram os resultados para calibração dos modelos de contato e adesão no DEM. Três diferentes tipos de teste foram utilizados:

- Teste de escoamento livre;
- Teste de escoamento em caixa;
- Teste de escoamento central.

O ângulo de repouso é geralmente calculado a partir do teste de escoamento livre, realizado em triplicata, com auxílio de um cone ou cilindro (PVC ou acrílico) de diâmetro igual a 100 mm e altura igual a 300 mm. Em superfície plana, o aparato é preenchido com minério e realizado movimento vertical para cima, suavemente, em velocidade constante, deixando escoar livre o material pelo cilindro, resultando em uma pilha cônica com ângulo de repouso medido entre o cone e o plano (Figura 16).

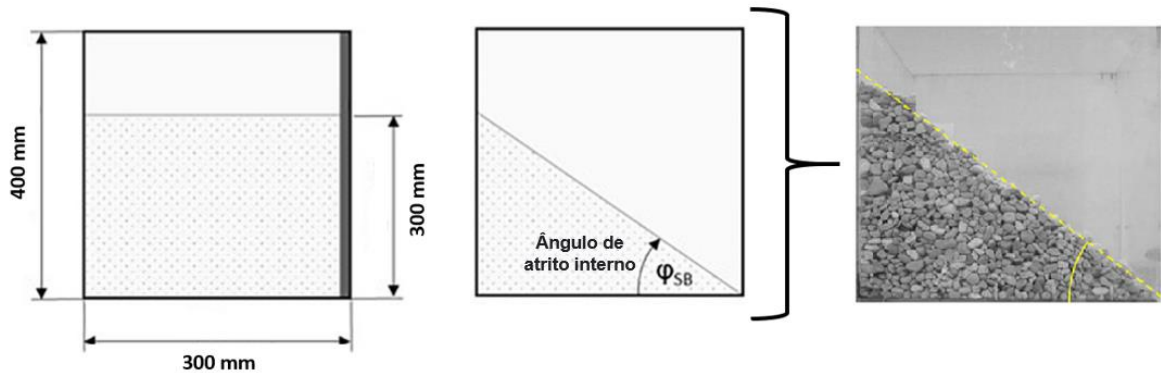
Figura 16 - Princípio do teste de escoamento livre



Fonte – Modificado de Roessler et al. (2019).

Para o cálculo do ângulo de atrito interno tem-se a opção do teste padrão de escoamento em caixa. O teste é realizado em triplicata, a partir do enchimento de uma caixa de acrílico de 400 x 300 mm, com abertura de um dos lados, em que o material possa escoar livremente pelo próprio material, representando um fluxo dinâmico (Figura 17).

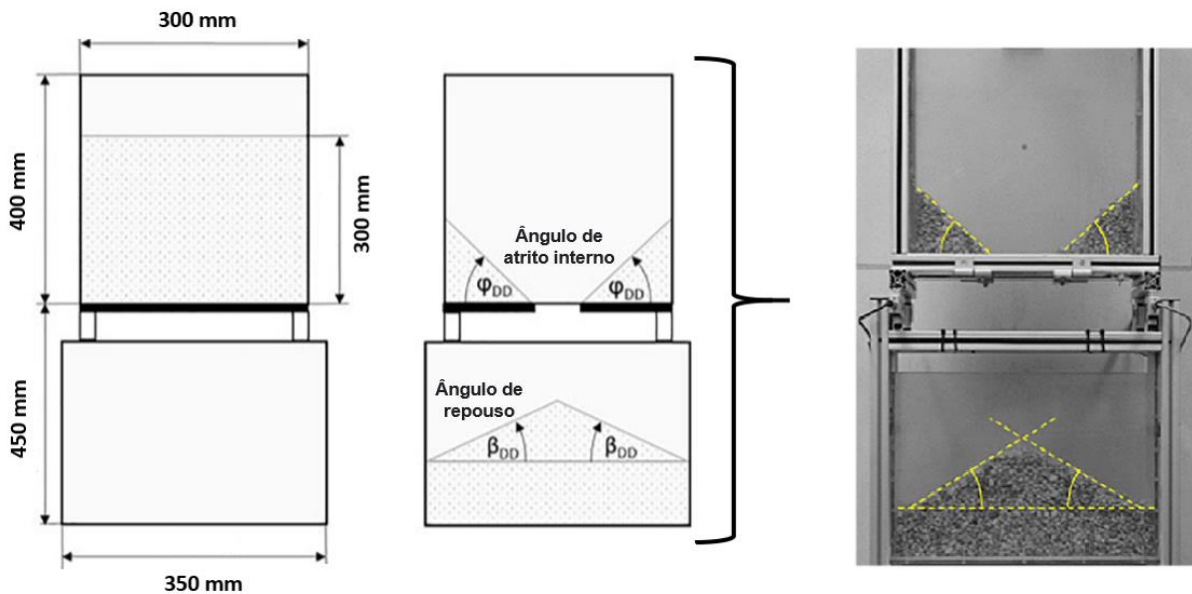
Figura 17 - Princípio do teste de escoamento em caixa



Fonte – Modificado de Roessler et al. (2019).

Além dos testes de escoamento em caixa e escoamento livre, para definição do ângulo efetivo de atrito interno e ângulo de repouso, respectivamente, o teste de escoamento central também é utilizado para definição desses parâmetros combinados. O aparato para o teste é constituído de uma caixa superior com 400 mm de altura, 300 mm de largura e 100 mm de profundidade e uma inferior de 450 mm de altura, 350 mm de largura e 150 mm de profundidade. A abertura central é equivalente a 1/5 da largura da caixa, mas deve ser dimensionada de acordo com o tamanho máximo da partícula contida no material a ser testado (Figura 18).

Figura 18 - Princípio do teste de escoamento central



Fonte – Modificado de Roessler et al. (2019).

3.2.2.2 Caracterização de outras propriedades físicas

A análise lógica das técnicas e métodos utilizados para a determinação da umidade de materiais particulados mostra de forma inequívoca que amostragem e análise são dois aspectos indissociáveis de um mesmo problema de estimativa. Além disso, é a desvalorização dessa evidência que é responsável pelas muitas dificuldades encontradas na determinação do teor de umidade (PITARD, 2019).

A umidade é definida como o peso de água que pode ser eliminada por secagem a uma condição especificada de temperatura, pressão e circulação de ar (PITARD, 2019). Em tratamento de minérios, a umidade é sempre definida em base seca e em peso (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007). O cálculo da umidade, expresso em (%), é feito com o auxílio da equação a seguir.

$$Umidade (\%) = \frac{(massa\ úmida) - (massa\ seca)}{(massa\ úmida)} * 100 \quad (23)$$

A determinação da umidade é constituída, assim, por três passos:

- Pesagem antes da secagem;
- Secagem sob condições específicas;
- Pesagem após secagem.

No processamento de minérios, o manuseio do minério se dá na forma de materiais particulados coesivos. Há, portanto, a necessidade de se conhecer a densidade real e a densidade aparente:

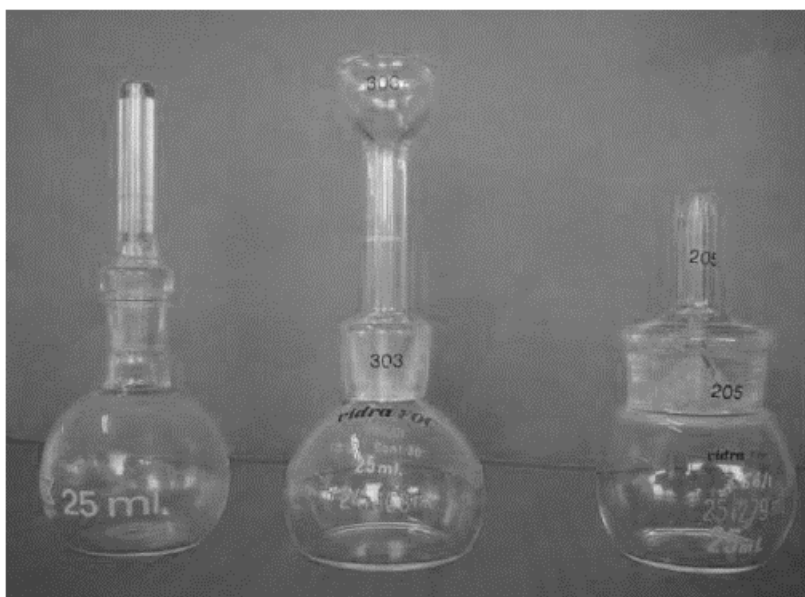
- Densidade real ou relativa considera apenas o volume do conjunto de grãos que compõem a amostra, sem considerar os espaços vazios existentes entre os grãos;
- Densidade aparente considera o volume total da amostra, inclusive os espaços vazios existentes entre os grãos que a compõem.

Matematicamente, a densidade (d) é a razão entre a massa de uma substância (m) e o seu volume (V) (ATKINS; JONES, 2001).

$$d = \frac{m}{V} \quad (24)$$

Uma das técnicas utilizadas para medir a densidade relativa de sólidos é o método do picnômetro. Um picnômetro consiste, basicamente, num balão de vidro com fundo chato, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007). Os picnômetros mais usados variam entre 25 e 100 ml (Figura 19).

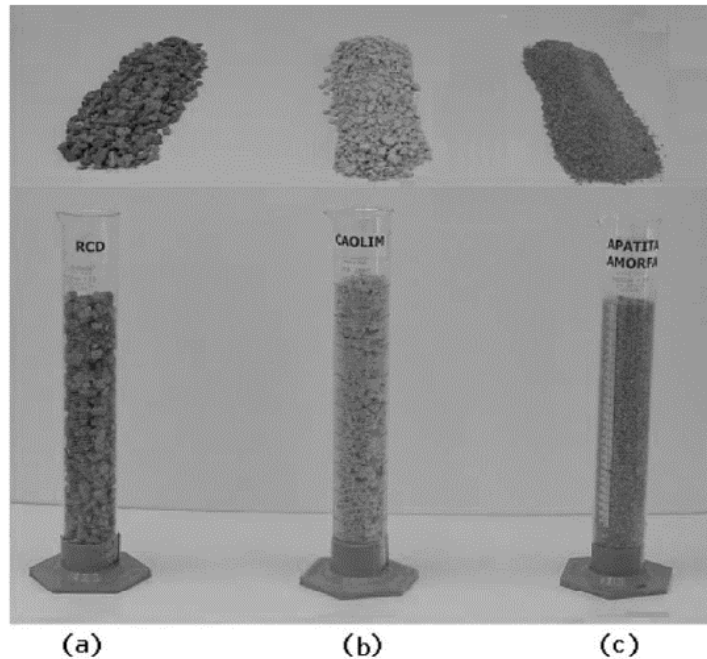
Figura 19 - Picnômetros usados em laboratório para determinação da densidade de sólidos



Fonte – (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007).

A determinação da densidade aparente, em base seca, consiste na medida do volume ocupado e peso de uma determinada amostra de material particulado. Nas operações de laboratório e/ou unidades piloto, a medida do volume da amostra pode ser feita com auxílio de uma proveta ou de um balde graduado, ou ainda de outros recipientes, também graduados (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007). É indispensável o uso de uma balança confiável, bem como equipamentos usados nas medidas dos volumes das amostras (Figura 20).

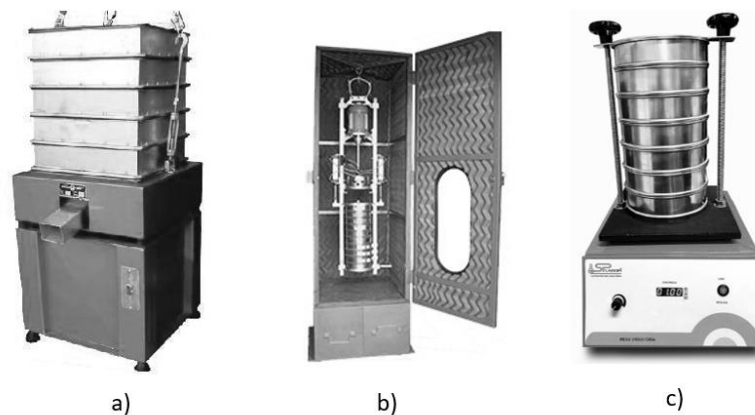
Figura 20 - Determinação da densidade aparente em proveta



Fonte – (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007).

Outra propriedade do material que se faz necessária é a distribuição granulométrica da amostra. Nos ensaios de granulometria devem ser considerados o peso da amostra, o tempo de peneiramento, além do tipo da amostra a ser peneirada. Geralmente, amostras de minério particulado podem ser tratadas por peneiramento a seco, visto baixo teor de umidade do material e necessidade de obtenção somente dos resultados para a fração grossa. Para grandes quantidades de amostra, pode ser utilizado peneirador horizontal de peneiras quadradas, e para pequenas quantidades, é utilizado peneirador suspenso ou de bancada (Figura 22).

Figura 21 - a) Peneirador horizontal quadrado; b) Peneirador suspenso; c) Peneirador de bancada



Fonte – Acervo do autor.

Apesar de não ser um parâmetro físico, a análise química de ouro por fração granulométrica é de fundamental importância para o trabalho. O ouro ocorre em diferentes concentrações por faixa granulométrica, efeito intrínseco ao tipo de associação e grau de liberação do ouro (MARSDEN; HOUSE, 2006). Devido a esse efeito, os erros de amostragem podem ser potencializados de forma diferente para diferentes faixas granulométricas. A técnica analítica mais antiga e utilizada para a análise de ouro é chamada “*fire assay*” (SANTOS-MUNGUÍA et al., 2019).

3.2.3 Rocky DEM

O Rocky DEM é um *software* de modelagem baseado no Método dos Elementos Discretos (DEM), para simulação de sistemas de partículas tridimensionais. O *software* simula a interação entre partículas e outros elementos do sistema a partir da calibração dos parâmetros de simulação. Atualmente é um dos mais utilizados, devido a sua capacidade de aplicação e simulação em diferentes áreas. Fornece resultados tanto qualitativos quanto quantitativos durante e após o processamento das simulações, com base em resultados visuais e numéricos.

Seguindo a mesma tendência de outros *softwares* do mercado, o Rocky DEM é útil para analisar o fluxo de partículas e detectar ineficiência nos sistemas, processos de fabricação e projeto. Ele ajuda na tomada de decisões que permitem por exemplo, aumentar a vida útil e a capacidade dos equipamentos, reduzir consumo energético e desgaste de componentes, além de minimizar problemas de manuseio (ANDRÉ, 2019).

A determinação da distribuição granulométrica e forma das partículas pode ser determinada por entradas diretamente no *software*. Também existe a possibilidade de geração automática da distribuição granulométrica a partir do grupo de maior tamanho de partícula para o menor (ROCKY DEM, 2020).

3.3 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO E MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

O planejamento de experimentos (DOE) é um método eficiente para planejamento de experimentos, fornecendo dados analíticos essenciais para tomadas de decisão e tem sido um forte aliado nas otimizações de processo em busca da excelência operacional. O DOE é especialmente útil para realizar análises simultâneas em múltiplas variáveis e de forma eficiente. A ferramenta pode determinar as melhores variáveis independentes ou o melhor conjunto de variáveis, verificando sua influência ou otimizando a resposta da variável dependente. No contexto industrial, o DOE pode ajudar a identificar os melhores parâmetros para produzir os resultados desejados.

O planejamento de experimentos teve sua origem por volta de 1920, com o pioneirismo de Sir Ronald A. Fisher, aplicando os primeiros conceitos da ferramenta em campos de agricultura. Utilizou com sucesso o conceito de planejamento fatorial e Análise de Variância (ANOVA). Mais tarde, por volta de 1950, George Box aplicou e desenvolveu métodos de planejamento de experimentos para a indústria química (JOHNSTONE, 2010). Atualmente, observam-se diferentes aplicações da ferramenta em sistemas de ensino e serviços (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2009).

Existem três métodos de análise utilizados em planejamento de experimentos: experimento fatorial, Taguchi e superfície de resposta.

Um DOE eficiente pode reduzir significativamente tempo e custos. O DOE essencialmente organiza a condução de experimentos de forma que o máximo de informações relevantes possam ser extraídas de um menor número de experimentos (KLEIJNEN, 2008). Para experimentos com uma única variável independente, torna-se mais fácil o planejamento, de forma que essa variável, quando alterada, implicará em uma alteração direta na variável dependente. À medida que o número de variáveis independentes aumenta, o número de experimentos necessários para investigar todas as combinações possíveis de variáveis aumentará exponencialmente. Por exemplo, considerando-se um experimento com quatro variáveis independentes, cada uma com três níveis (alto, médio e baixo) e duas respostas medidas, o número de experimentos

utilizando-se uma matriz fatorial com todas as combinações seria de $3^4 \times 2 = 162$. Neste caso, a técnica de planejamento fatorial seria bem mais eficiente. Para este trabalho, a técnica de planejamento fatorial foi escolhida visando a uma redução do número de testes utilizados para calibração dos parâmetros DEM.

Taguchi defende o uso do DOE para auxiliar na melhoria da qualidade, principalmente em relação à indústria (TAGUCHI, 1987). Enquanto muitos métodos de simulação/otimização pressupõem ambientes conhecidos, Taguchi utilizou metodologias baseadas em ambientes incertos, onde os fatores são difíceis de controlar. Sua abordagem foi originalmente desenvolvida para ajudar a Toyota a projetar carros “robustos” que teriam um desempenho adequado em uma ampla gama de aplicações (WU; HAMADA, 2000). Um aspecto chave para a abordagem de Taguchi envolveu a redução da variabilidade, concentrando-se na média da variância resposta. O objetivo era reduzir a variabilidade do parâmetro de qualidade em torno de uma meta ou valor nominal. Taguchi é responsável por renovar a aplicação e os conceitos do planejamento de experimentos e introduzir a ferramenta no contexto industrial ao longo das últimas décadas.

A metodologia de superfície de resposta (RSM) foi desenvolvida por Box e Wilson, que originalmente aplicaram o método a sistemas reais (BOX; WILSON, 1951). O RSM é uma heurística de otimização que tenta estimar a combinação de variáveis de entrada que minimizem uma determinada função objetivo uni-variada em um método *stepwise* (multiestágio). Nestas etapas, o RSM usa a superfície de resposta polinomial local de primeira e segunda ordem. Embora o RSM seja uma aproximação, sua popularidade decorre de sua simplicidade de modelagem e aplicação, principalmente quando pouco se sabe sobre o processo.

Uma breve revisão foi mostrada para introdução da ferramenta de planejamento de experimentos. Os métodos são descritos em detalhe por Taguchi (1987), Kleijnen (2008), Wu e Hamada (2000) e Myers et al. (2009).

3.3.1 Software de Análise Estatística

Existem muitos programas com pacotes de ferramentas estatísticas disponíveis. O *software* de análise estatística usado nesta dissertação é o Minitab 19. Uma das principais vantagens do Minitab é a possibilidade de realizar de forma rápida e simples o planejamento e análise do experimento. O Minitab disponibiliza vários métodos de planejamento de experimentos, o mais comum e utilizado neste estudo foi o experimento fatorial .

O experimento fatorial é um tipo de experimento planejado que permite observar os efeitos que vários fatores podem ter sobre uma resposta. Ao conduzir uma experiência, variando os níveis dos fatores ao mesmo tempo, em vez de um de cada vez, permite observar as interações entre esses fatores. O experimento fatorial pode ser completo ou fracionado.

Um experimento fatorial completo é um experimento no qual pesquisadores medem respostas em todas as combinações dos níveis de fatores. Os experimentos fatoriais completos podem conter fatores com dois níveis ou mais. O número de ensaios necessários para um experimento fatorial completo de dois níveis é 2^k em que k é o número de fatores. Se o número de fatores aumentar, automaticamente o número de testes também aumentará. O experimento fatorial fracionado é uma opção a experimentos que têm muitos fatores.

Um experimento fracionado é aquele em que se opta por realizar apenas um subconjunto ou uma "fração" dos ensaios do experimento fatorial completo. Os experimentos fatoriais fracionados são uma boa opção quando os recursos são limitados ou o número de fatores no experimento é grande. O experimento fatorial fracionado utiliza um subconjunto de um experimento fatorial completo, de forma que alguns dos efeitos principais e interações de dois fatores são confundidos e não podem ser separados dos efeitos de outras interações de ordem superior. Normalmente, os experimentadores estão dispostos a assumir que os efeitos de ordem superior são insignificantes a fim de obterem informações sobre os efeitos principais e as interações de ordem inferior com menos ensaios.

3.3.2 Regressão Simples e Multivariada

Karl Pearson usou pela primeira vez o termo “regressão multivariada” em 1908, o qual tem sido amplamente utilizado em muitas aplicações científicas e industriais desde então. A regressão multivariada compartilha todas as suposições de correlação, incluindo a linearidade e a mesma variância finita em todo o intervalo das variáveis independentes. Em um gráfico de dispersão onde é desejada a obtenção de uma regressão linear entre uma variável independente x e uma variável dependente y , o método dos mínimos quadrados ajusta uma linha reta ao conjunto de pontos, de modo que os desvios dos pontos observados até a reta sejam minimizados. A linha de regressão para um espaço bidimensional é definida pela equação $y = a + bx$, onde a variável y é expressa pela interceptação em a e o coeficiente de regressão b .

Nos casos da regressão multivariada, a regressão não é mais visualizada de maneira bidimensional. Inserem-se, assim, os outros termos na equação, representados por outros fatores independentes.

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p \quad (25)$$

É importante especificar corretamente o modelo. A exclusão de variáveis independentes importantes ou a inclusão de variáveis anômalas pode alterar drasticamente o resultado e, conseqüentemente, a interpretação da influência das variáveis independentes. A metodologia por trás das regressões multivariadas é brevemente mostrada a seguir.

Os valores previstos ou ajustados são encontrados em cada caso usando uma mesma equação. Os resíduos são a diferença entre os valores previstos pela equação e os valores reais observados. O coeficiente de regressão R^2 indica quão bom é o ajuste dos dados reais em comparação com os valores regredidos.

$$R^2 = \frac{\sum(y_i - y_{est,i})}{\sum(y_i - y_{medio})} \quad (26)$$

Onde y_i é o valor real de $y_{est,i}$ para o enésimo caso i , y é a previsão da regressão para o enésimo caso i e y_{medio} é a média dos valores y_i . O coeficiente R^2 varia entre 0 e 1 e é uma medida estatística do quão bem a regressão descreve os dados reais. Valores próximos de 1 indicam um bom ajuste da regressão aos dados.

Na regressão linear multivariada, assume-se que as relações entre as variáveis são lineares, mas, na maioria dos casos, isto não pode ser afirmado. Embora os procedimentos para utilização da regressão multivariada geralmente não sejam afetados por pequenos desvios dessa suposição, ainda é prudente observar o gráfico de dispersão e determinar se outros artifícios estatísticos são necessários ou não. A principal limitação conceitual da regressão é que as relações podem ser obtidas de forma errônea se limitado a um pequeno conjunto de dados de variáveis independentes. Com isso, o aumento da base de dados ou inclusão de novas variáveis, aumentará a chance de produzir resultados significativos.

3.3.3 Função *Desirability*

Derringer e Suich, em meados dos anos de 1980, destacaram o problema de predição de parâmetros independentes ótimos para a obtenção de um produto com determinada característica resposta (DERRINGER; SUICH, 1980). Este problema já havia sido abordado nos anos 60, apresentando os primeiros conceitos de função *desirability* (HARRINGTON, 1965). No entanto, Derringer e Suich modificaram sua abordagem, transformando várias variáveis de resposta em uma função *desirability* que pode então ser otimizada por técnicas univariadas. Seu método foi validado no desenvolvimento de um composto químico à base de borracha para pneus.

A função *desirability* para a otimização de múltiplas variáveis independentes é o método utilizados no procedimento de otimização descrito nesta dissertação.

4 DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO

4.1 LOCALIZAÇÃO

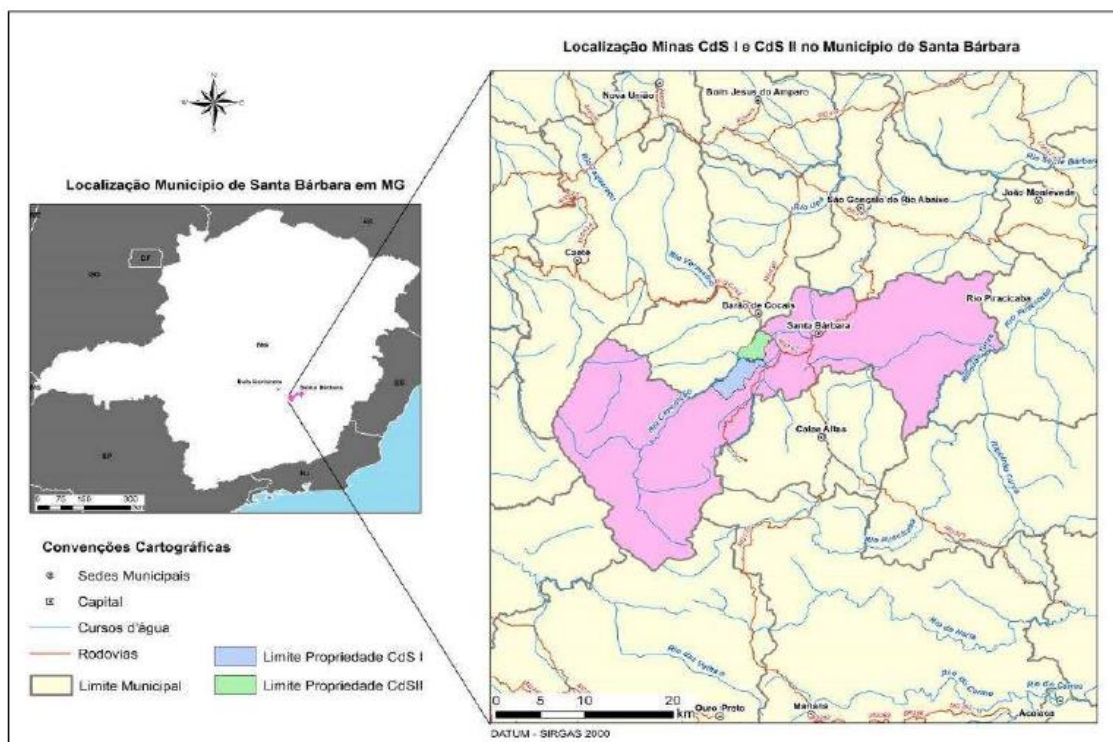
O Complexo Minerador Metalúrgico da AngloGold Ashanti (AGA) denominado Córrego do Sítio, localiza-se no município de Santa Bárbara, MG. Inserido no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, o complexo é composto por duas áreas: Córrego do Sítio I (CDS I) e Córrego do Sítio II (CDS II).

Córrego do Sítio I localiza-se no município de Santa Bárbara, a aproximadamente 110 km de Belo Horizonte. Córrego do Sítio II localiza-se, também, no município de Santa Bárbara. As figuras 22 e 23 da página seguinte mostram, respectivamente, o mapa da macrolocalização do empreendimento e os limites territoriais do complexo.

A região está inserida na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero e é drenada pela bacia do Rio Doce. O córrego que dá nome à região, Córrego do Sítio, é afluente da margem esquerda do Córrego Caraça, o qual é afluente da margem direita do rio Conceição.

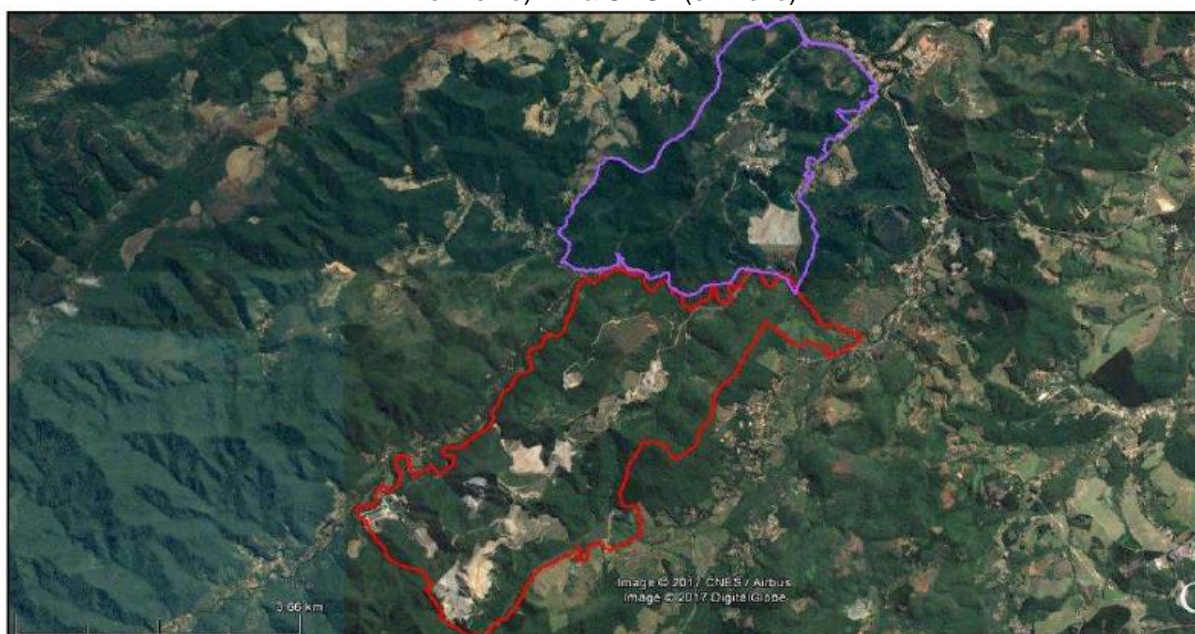
As rochas da mina Córrego do Sítio, pertencentes ao grupo Nova Lima, Supergrupo Rio das Velhas, ocorrem em uma sequência vulcanossedimentar arqueana tipo *greenstone belt*.

Figura 22 - Localização do complexo Córrego do Sítio



Fonte – Acervo do autor.

Figura 23 - Imagem de satélite mostrando os limites do complexo Córrego do Sítio - Mina CDSI (em vermelho) Mina CDSII (em roxo)

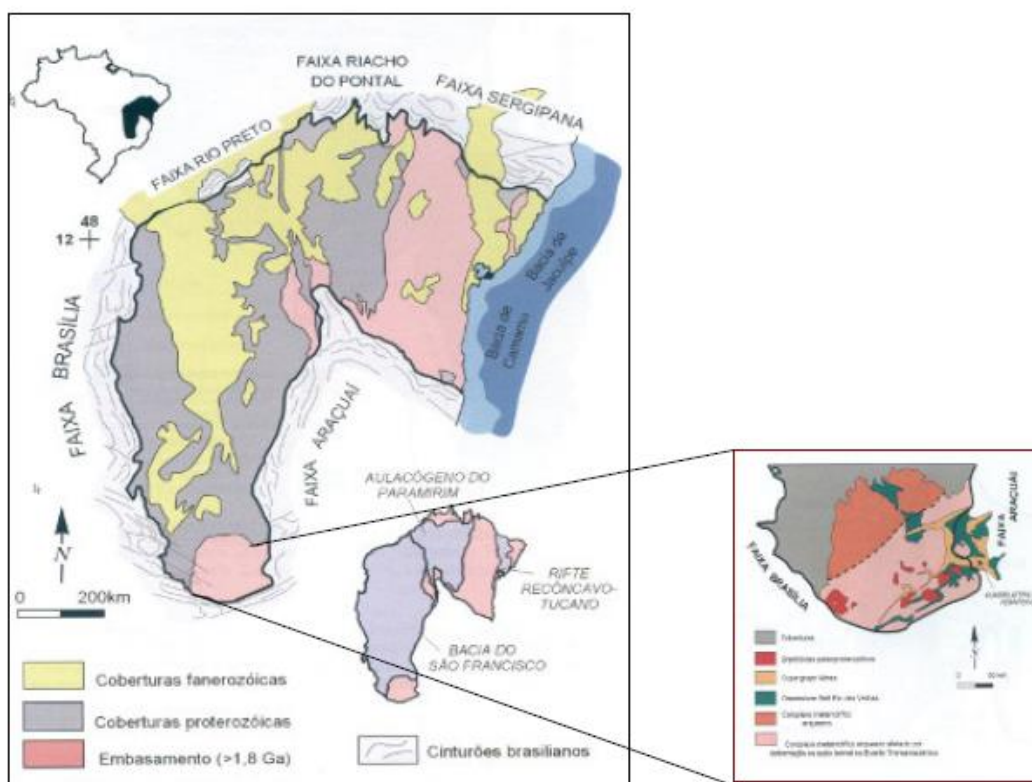


Fonte – Acervo do autor.

4.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

A jazida de ouro do complexo Córrego do Sítio está localizada na parte leste do *greenstone belt* arqueano Rio das Velhas (Figura 24), na região do Quadrilátero Ferrífero, na margem sul do Cráton do São Francisco. Representa um depósito de ouro orogênico inferido do Arqueano Superior, hospedado em xistos e metagrauvacas carbonáceas clásticas e vulcanoclásticas intensamente deformadas em aproximadamente 30 km de zona de cisalhamento NE-SW.

Figura 24 - Localização da região do quadrilátero ferrífero na parte sul do Cráton do São Francisco.

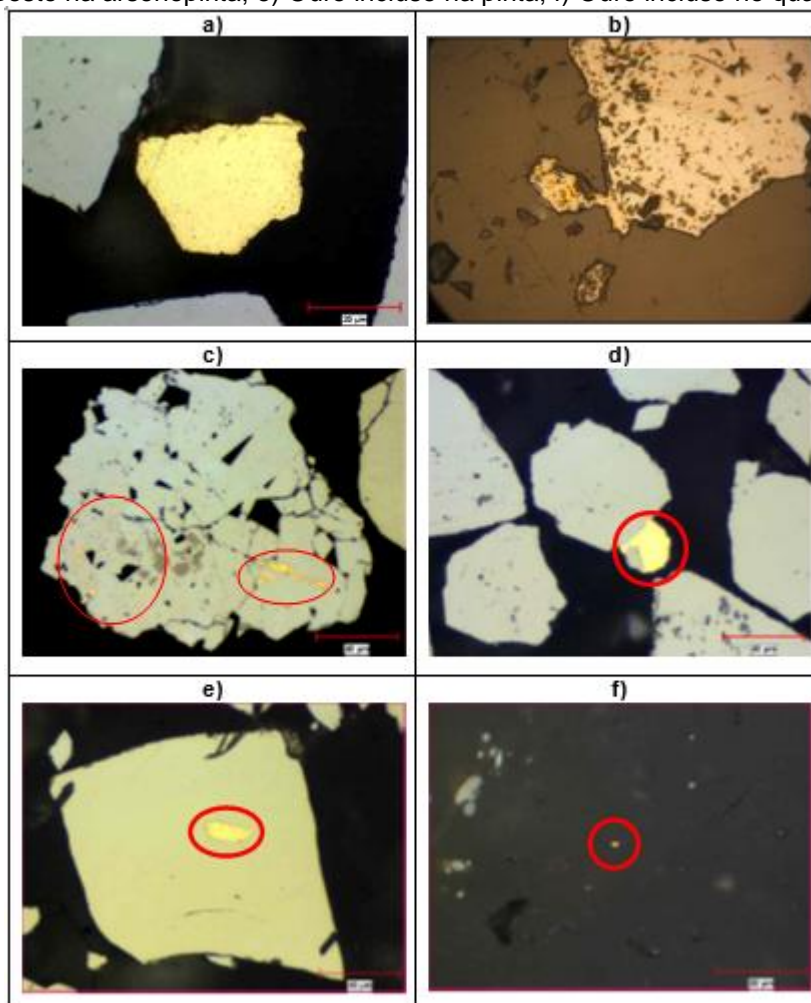


Fonte – Acervo do autor.

Fases de alteração hidrotermal são percebidas associadas à mineralização dominada por sericita e carbonato. Distinguem-se três tipos principais de minério: veios de ouro-quartzo-carbonato-sulfeto em xistos carbonáceos, ouro e sulfetos disseminados em xistos carbonáceos ou em metagrauvacas brechadas e ouro-quartzo-sulfeto em uma formação ferrífera bandada tipo Algoma, como acontece na mina São Bento e na mina Pilar (propriedade da Jaguar Mining).

Minerais de sulfeto e sulfossais incluem arsenopirita, pirrotita, pirita, bertierita (Figura 25) e minerais acessórios como esfalerita, calcopirita, boulangerita, cobaltita, ulmanita, estibinita, tetraedrita e cinnabar. Ouro submicroscópico também se faz presente na matriz dos sulfetos, predominantemente na arsenopirita.

Figura 25 - a) Ouro livre; b) Ouro incluído na bertierita; c) Ouro fino incluído na arsenopirita; d) Ouro exposto na arsenopirita; e) Ouro incluído na pirita; f) Ouro incluído no quartzo.



Fonte – Acervo do autor.

Uma mudança no potencial redox induzida pela interação de água, gás carbônico e fluidos hidrotermais complexos com xistos carbonáceos sedimentares clásticos, vulcanoclásticos e metagrauvas ao longo de zonas de cisalhamento, são interpretados como os principais controles sobre a mineralização de ouro neste depósito.

4.3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO

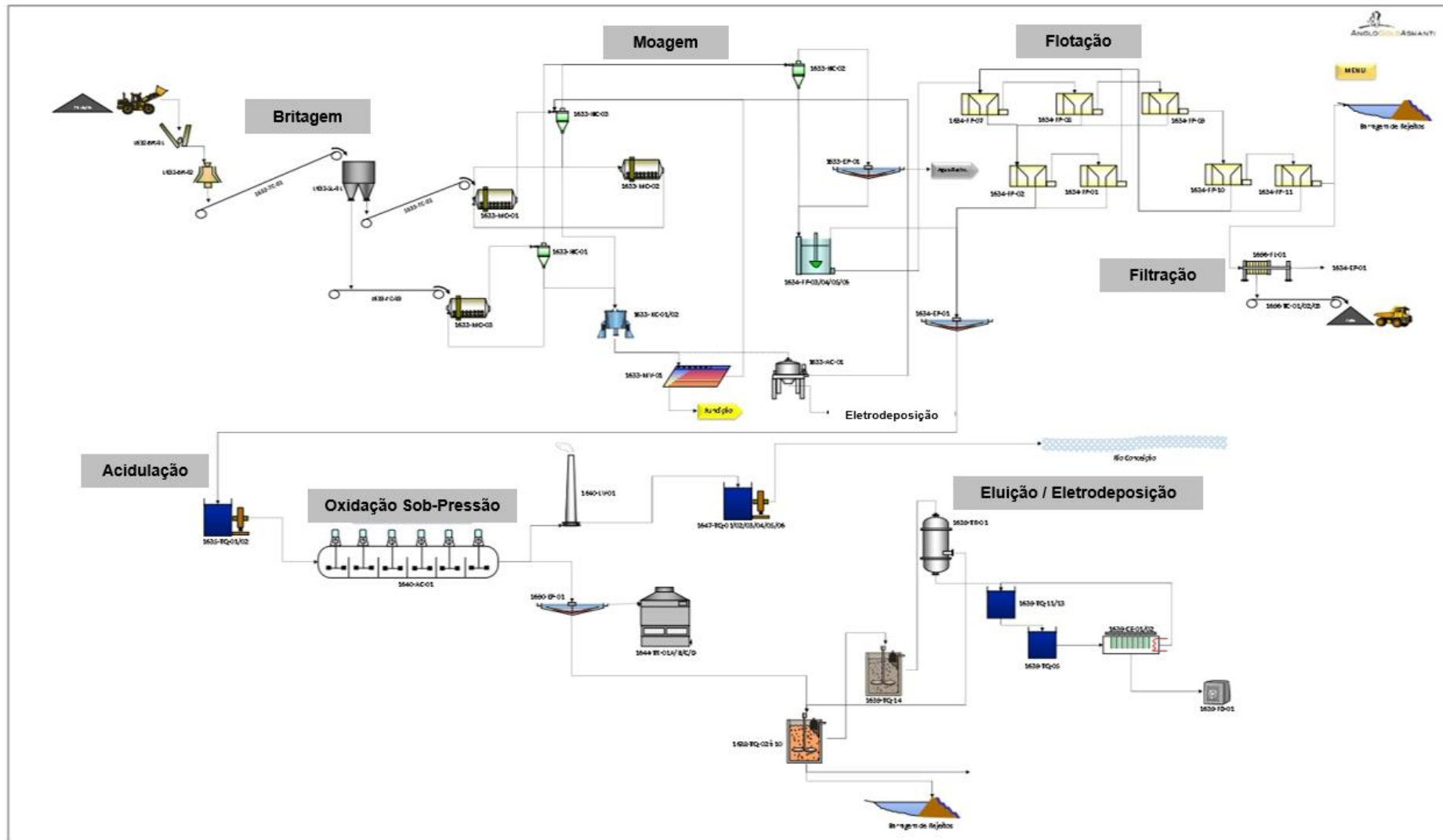
O processo de beneficiamento do minério (Figura 26) é composto pelas operações de britagem, moagem, concentração gravimétrica, flotação, acidulação, oxidação sob pressão, lavagem em contracorrente (CCD), lixiviação/adsorção, eluição e eletrodeposição, onde o ouro, prata e demais metais são depositados sob a forma de cátodos. Os produtos, então, são encaminhados periodicamente para a unidade de fusão e refino, localizada na usina do Queiroz, também pertencente à AngloGold Ashanti, na cidade de Nova Lima, MG. Ao final da etapa de beneficiamento, os rejeitos (flotação e CIL) são encaminhados para o circuito de filtragem e, em seguida, dispostos a seco.

O ROM (*Run of Mine*) é transportado por caminhões através da estrada interna por aproximadamente 5 km até a usina de Córrego do Sítio II. O minério é estocado em pilhas a céu aberto em um pátio situado próximo à moega, para controle de *blend* e teor. Utiliza-se um britador de mandíbulas como britador primário e um britador cônico como britador secundário. O produto do circuito tem P_{80} em 9 mm e alimenta o silo de estocagem de minério britado.

O circuito de moagem recebe a alimentação direta do silo de minério britado em duas linhas paralelas. A primeira linha de moagem é composta por um moinho de bolas, concentração gravimétrica e classificação por ciclones em circuito fechado. A segunda linha é bastante similar à primeira, com diferenciação do moinho SAG operando como primário e um segundo moinho de bolas para remoagem, conferindo potência extra ao circuito. O produto final tem P_{80} em 74 μm .

O circuito de flotação é composto por dois tanques condicionadores, duas linhas de células *rougher* (células tanque e convencionais), uma linha de células *cleaner* (células tanque e convencionais) e uma linha de células *scavenger* (células convencionais). A flotação foi concebida para flotação de sulfetos, principalmente arsenopirita, e utiliza três tipos de reagentes: ativador (sulfato de cobre), coletor (ditiofosfato + xantato PAX) e espumante (MIBC modificado). A recuperação de ouro é de aproximadamente 91%.

Figura 26 - Fluxograma geral da usina de beneficiamento de minério sulfetado CDSII



Fonte – Acervo do autor.

O concentrado de flotação é direcionado para os tanques de acidulação e, posteriormente, para a alimentação do circuito de oxidação ácida sob pressão. Nesse circuito, minerais sulfetados são oxidados em elevadas temperaturas e pressão com utilização de oxigênio para liberação do ouro refratário e aumento da recuperação de ouro no circuito de lixiviação. O circuito de oxidação sob pressão consiste em um tanque de alimentação, autoclave, tanque *flash*, tanque condicionador, lavador de gases, sistema de água de resfriamento e bombas associadas. Após o processo de oxidação, a polpa é lavada em circuito CCD e direcionada para a lixiviação.

O processo de lixiviação ocorre através da dissolução do ouro por cianeto. No circuito CDS, o processo utilizado é o CIL (*carbon in leaching*). Neste tipo de circuito, lixiviação e adsorção em carvão ativado ocorrem de forma simultânea em tanques. A recuperação média de ouro neste circuito é de 95%.

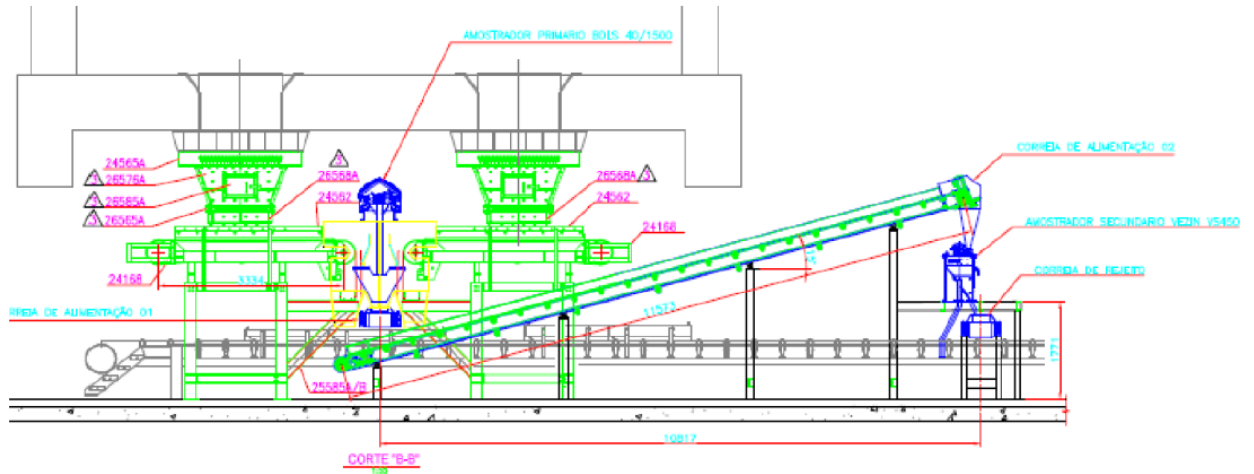
Após lixiviação e adsorção, o carvão carregado rico em ouro é direcionado para a coluna de eluição e, em seguida, a recuperação do ouro é feita em solução por eletrodeposição.

4.4 SISTEMA DE AMOSTRAGEM DA ALIMENTAÇÃO DA USINA

O sistema de amostragem da alimentação da usina foi instalado no início de 2019, como resultado de exaustivos trabalhos de reconciliação na usina. O sistema é composto por um amostrador linear corta-fluxo de descarga contínua e amostrador secundário rotativo tipo *Veizin*, conforme desenho técnico apresentado na Figura 27. Visando eliminar a necessidade de instalação de dois amostradores primários a geração do erro de ponderação do incremento (IWE), a melhor e mais econômica solução foi dimensionar um único sistema de amostragem com dois amostradores opostos, fazendo com que ambos os alimentadores descarregassem o material no mesmo ponto. A solução apresentada eliminou qualquer necessidade de ponderação de massa alimentada pelos dois alimentadores no cálculo do teor da alimentação da usina. Além disto, a instalação de um amostrador secundário tipo *Veizin* eliminou a necessidade de manuseio de grandes massas de amostra no laboratório e, conseqüentemente, a geração desnecessária de erros adicionais de preparação, visto

que, dentre os métodos de divisão de amostras, o rotativo é o que gera menores desvios (ALLEN; KHAN, 1979).

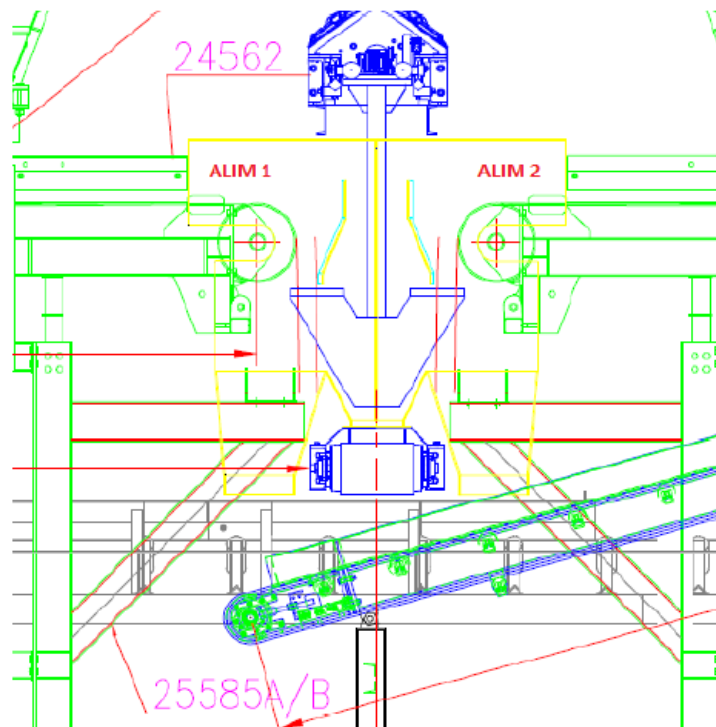
Figura 27 - Arranjo geral dos amostradores primário e secundário



Fonte – Acervo do autor.

Todo o sistema foi personalizado e instalado nos alimentadores abaixo do silo de minério britado (Figura 28).

Figura 28 - Detalhe da descarga dos dois alimentadores e posição do amostrador primário

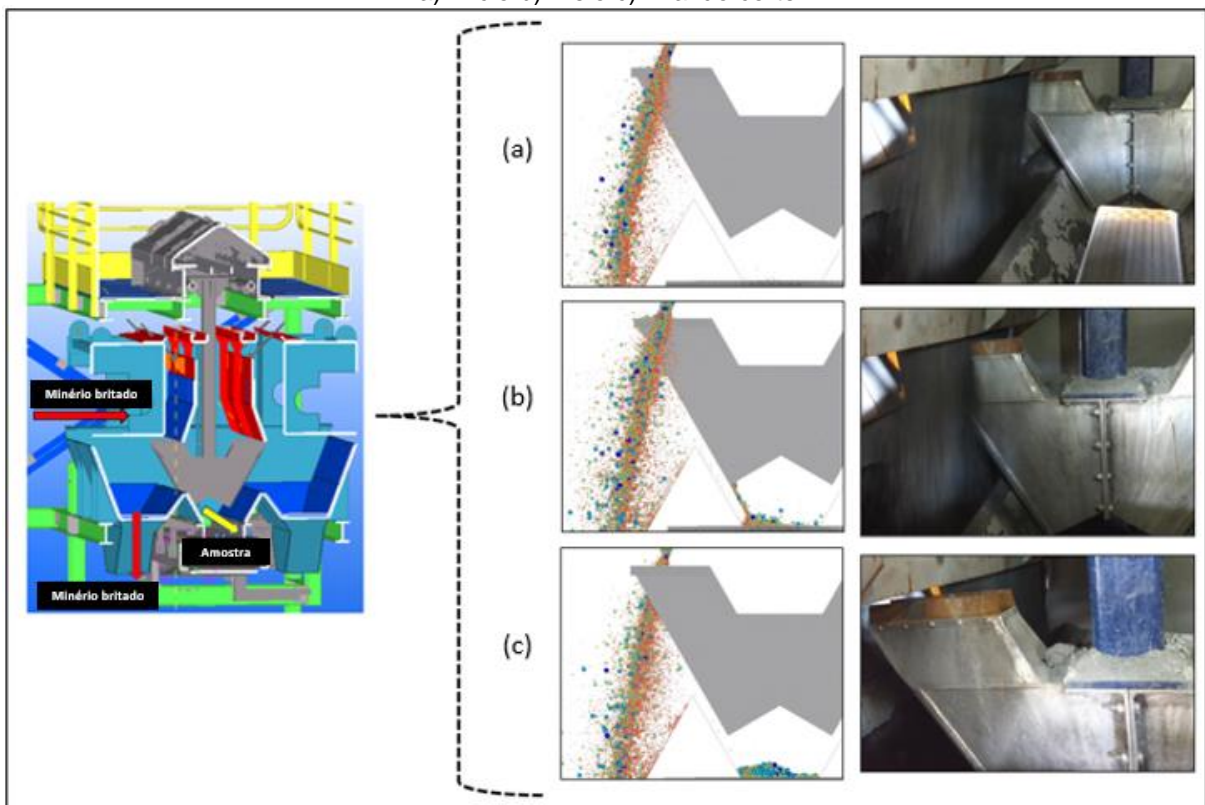


Fonte – Acervo do autor.

4.4.1 Especificações do Amostrador Primário

O amostrador primário da alimentação da usina, do tipo corta-fluxo, recebe minério britado dos alimentadores de correia do circuito de moagem. O minério é direcionado para o sistema por um desviador tipo “flap” que orienta o material para o amostrador. O fluxo para o equipamento é controlado pela taxa de moagem e o amostrador é acionado a cada dez minutos, definindo assim o tempo de corte. A Figura 29 mostra o projeto do equipamento e o amostrador em operação.

Figura 29 - Geometria 3-D do equipamento de amostragem primária (esquerda). Vista lateral do amostrador implementado no Rocky DEM e fotos reais do equipamento em operação (direita):
a) início b) meio c) final do corte



Fonte – Acervo do autor.

Após recebimento do sinal inicial, o amostrador primário faz um corte, deixando a posição inicial e avançando na direção perpendicular ao fluxo de minério. O amostrador intercepta o fluxo a uma velocidade constante parando na posição oposta e, criando, assim, ao longo do ciclo de amostragem, incrementos primários que alimentam o amostrador secundário. As especificações do equipamento são mostradas a seguir:

- Modelo: amostrador automático linear corta-fluxo;
- Direção do movimento: perpendicular ao movimento do fluxo;
- Abertura das facas do amostrador (A): 60 mm;
- Ângulo das facas do amostrador (γ): 70°;
- Ângulo da calha do amostrador (α): 60°;
- Velocidade do amostrador ($V_{m\acute{a}x}$): 45 cm/s;
- Vazão de sólidos (Q): 73 t/h.

4.4.2 Especificações do Amostrador Secundário

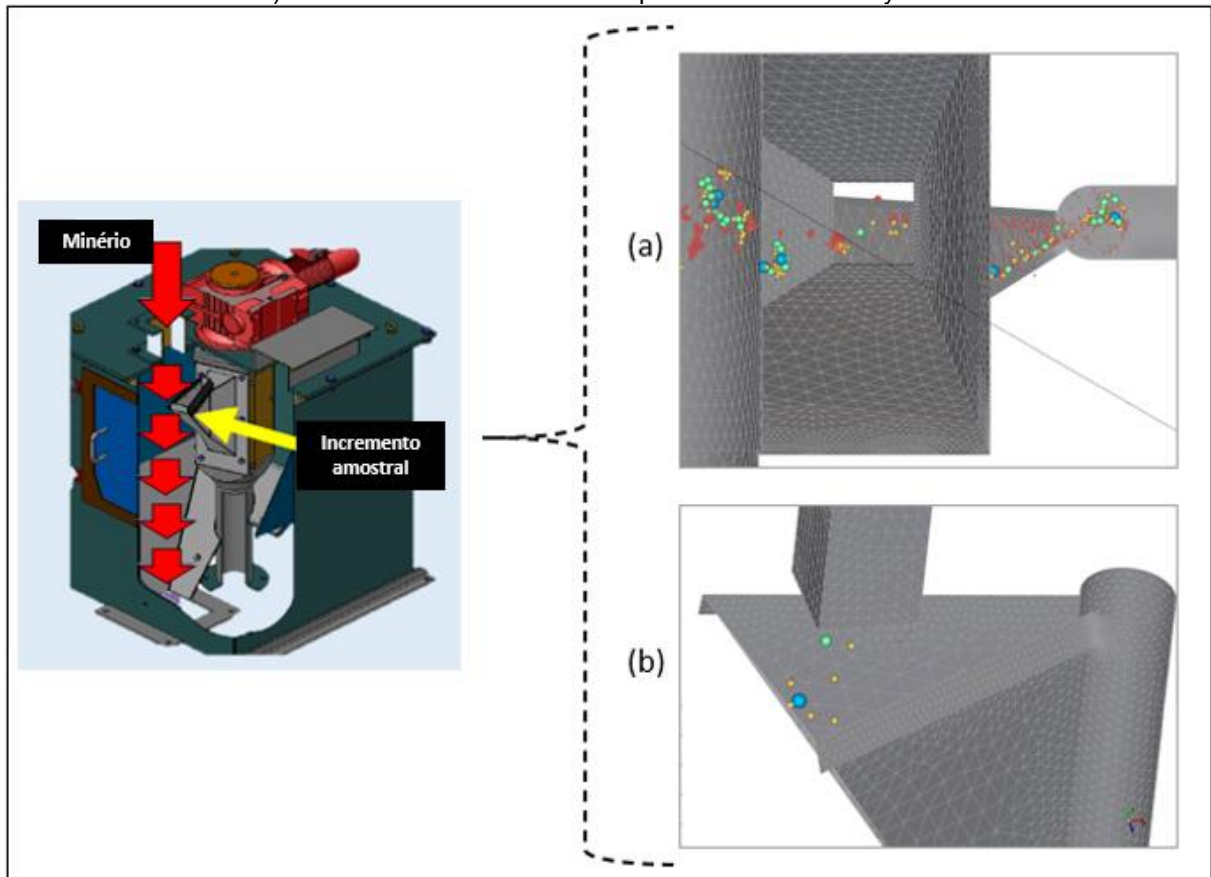
O amostrador secundário, rotativo do tipo *Veizin*, recebe o incremento coletado pelo amostrador primário realizando o segundo estágio de redução e composição da amostra final. O minério é alimentado por um transportador de correia e descarregado no chute de alimentação do amostrador secundário. O fluxo para o equipamento é controlado em velocidade constante pela correia de alimentação e o amostrador é acionado após 2 minutos do corte do amostrador primário. Esse tempo foi calculado a partir do tempo gasto para o incremento primário percorrer todo o sistema de correias até a alimentação do equipamento. O amostrador opera continuamente por mais dois minutos e, em sequência, é estacionado por sensor fora do sentido do fluxo. A Figura 30 mostra o projeto do equipamento e o amostrador em operação.

O amostrador secundário faz a divisão dos incrementos primários, coletando aproximadamente 10% de cada incremento. O coletor gira continuamente atravessando o fluxo, interceptando-o a cada giro e selecionando uma parte do material. Criam-se, assim, incrementos de amostra que, juntos, formarão a amostra final. O excedente do material não coletado no amostrador secundário retorna à correia de alimentação do circuito de moagem por sistema de correias de retorno. As especificações do equipamento são mostradas a seguir:

- Modelo: amostrador automático rotativo *Veizin*;
- Direção do movimento: perpendicular ao movimento do fluxo;
- Abertura das facas do amostrador (A): 60 mm;

- Ângulo das facas do amostrador (γ): 70°;
- Ângulo da calha do amostrador (α): 70°;
- Velocidade do amostrador ($V_{m\acute{a}x}$): 45 cm/s;

Figura 30 - Geometria 3-D do equipamento de amostragem secundária (esquerda): a) vista superior e b) vista lateral do amostrador implementado no Rocky DEM



Fonte – Acervo do autor.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada inclui basicamente três passos: (1) caracterização das propriedades físicas do material em laboratório; (2) calibração do modelo de contato entre partículas no Rocky DEM; e (3) simulações e análises.

Os parâmetros de caracterização do minério englobam a obtenção dos seguintes parâmetros:

- Densidade aparente;
- Densidade real;
- Distribuição granulométrica;
- Análise química de ouro por fração;
- Ângulo de atrito interno;
- Ângulo de repouso;
- Umidade.

Aproximadamente 100 kg de minério britado foi coletado no amostrador de alimentação da usina para realização dos testes de caracterização. Visando representar uma condição mais desafiadora para a amostragem, o minério foi coletado durante o momento em que a umidade se apresentava consideravelmente alta (2% a 3%). As amostras foram retiradas parando a correia e coletando um metro linear de minério; o procedimento foi repetido a cada 30 minutos, para umidades entre 2% e 3%, observadas no medidor *online* da usina. O minério foi embalado em sacos plástico de até 25 kg e direcionado ao laboratório de processo. Imediatamente, todo o volume foi homogeneizado e quarteado para retirada de uma alíquota para determinação de umidade.

A densidade aparente do minério foi determinada utilizando uma proveta de vidro de 2 litros e balança digital, conforme ilustrado na Figura 31 (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007). Para a determinação da densidade real foi utilizado um picnômetro de 100 ml, e a granulometria foi realizada por peneiramento a seco em uma série de

peneiras Tyler entre 15.000 e 74 μm . Após a separação das frações granulométricas, as massas foram encaminhadas ao laboratório químico para análise de ouro.

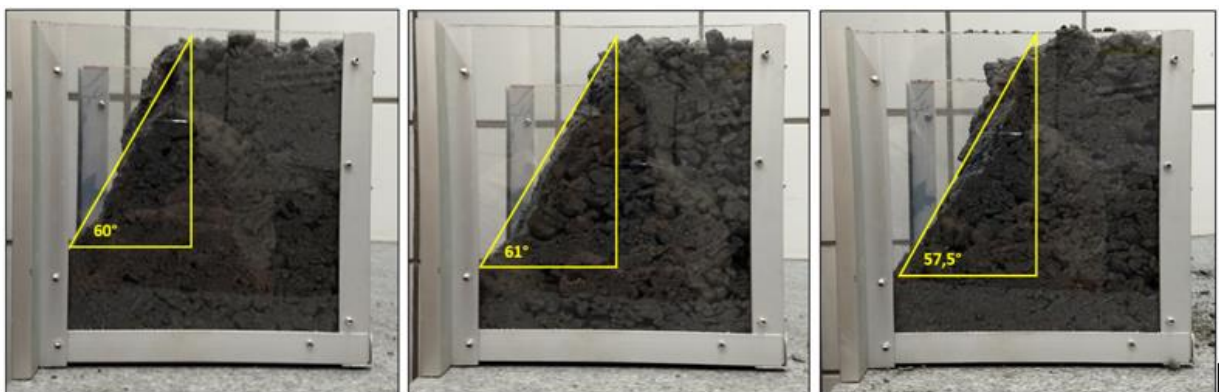
Figura 31 – Determinação da densidade aparente em proveta



Fonte – Acervo do autor.

Para a determinação do ângulo de atrito interno, o teste de escoamento em caixa foi utilizado (ILIC et al., 2019). A caixa é feita em acrílico e tem um comprimento de 400 mm, uma largura de 300 mm e uma altura de 400 mm. A parede de um dos lados é removível e pode ser aberta para permitir que o material particulado escoe para fora da caixa. O ângulo de atrito interno é indicado pelo ângulo formado entre o material e o plano horizontal (ILIC et al., 2019). O teste foi realizado em triplicata e o ângulo de atrito interno foi dado pela média dos testes (Figura 32).

Figura 32 - Teste de escoamento em caixa



Fonte – Acervo do autor.

O ângulo de repouso foi obtido a partir do teste de escoamento livre. O material particulado foi colocado em um cilindro de 100 mm de diâmetro e 300 mm de altura até que estivesse completamente cheio. Após o enchimento, o cilindro foi elevado a uma velocidade constante de aproximadamente 200 mm/s, deixando o material fluir livremente pelo fundo, formando uma pilha cônica. O ângulo de repouso é o ângulo medido entre o cone e o plano. O teste foi realizado em triplicata e o ângulo de repouso foi dado pela média dos testes (Figura 33).

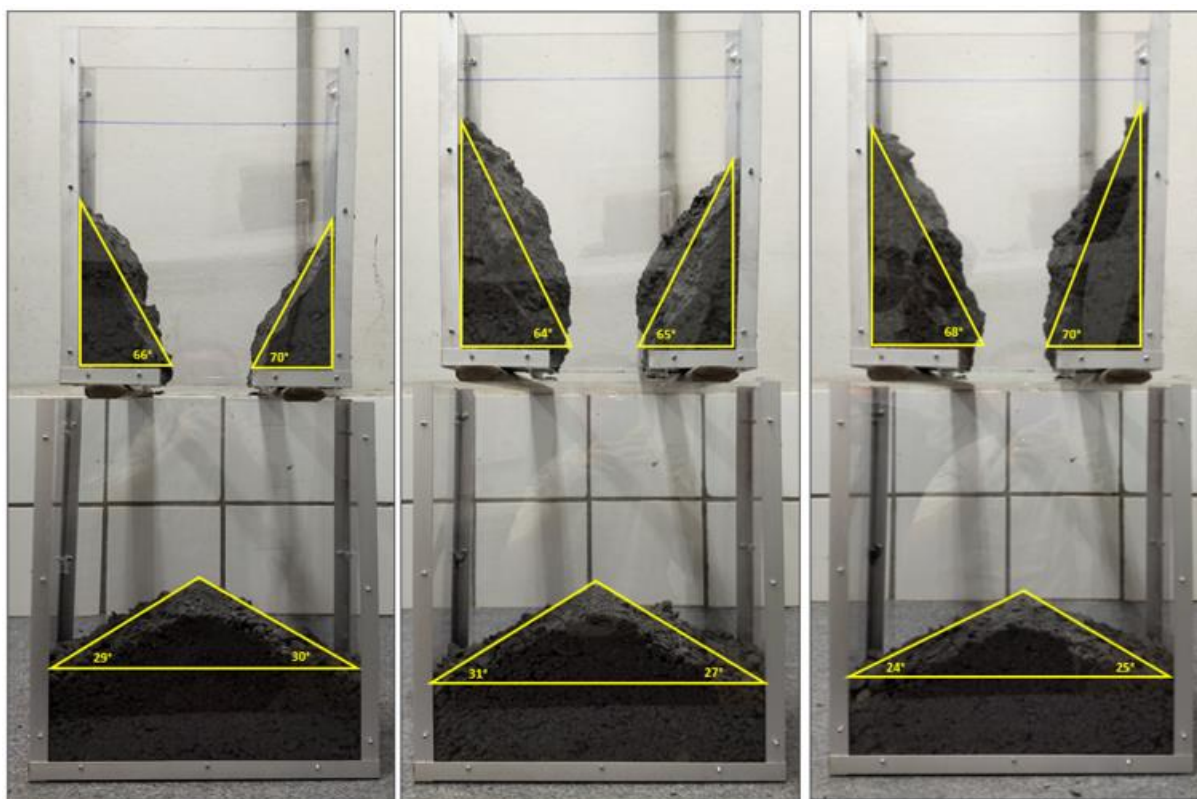
Figura 33 - Teste de escoamento livre



Fonte – Acervo do autor.

Como alternativa à medição direta dos parâmetros de contato (BARRIOS et al., 2013), as melhores práticas de calibração recomendam que a calibração DEM seja realizada usando diferentes testes que explicam as diferentes propriedades do material (BARRIOS et al., 2013; ROESSLER et al., 2019). Além dos testes de escoamento em caixa e escoamento livre para definição do ângulo de atrito interno e ângulo de repouso, respectivamente, o teste de escoamento central também foi realizado para definição desses parâmetros combinados (ROESSLER et al., 2019). O aparato para teste é constituído por uma caixa superior com 400 mm de altura, 300 mm de largura e 100 mm de profundidade e uma caixa inferior de 450 mm de altura, 350 mm de largura e 150 mm de profundidade. A caixa superior possui uma abertura retangular no centro inferior, que pode ser aberta para permitir a descarga da amostra do material particulado. Essa abertura corresponde a 1/5 da largura da caixa superior e é projetada para ter no mínimo 3 vezes o diâmetro da maior partícula do sistema (KETTERHAGEN; WASSGREN, 2022). O material descarregado forma uma pilha na caixa inferior, enquanto o material remanescente forma dois ângulos na caixa superior. Após a descarga, são tomadas as medidas do ângulo de atrito interno (ângulos formados pelo material na caixa superior) e ângulo de repouso (ângulo formado pelo material na caixa inferior). O teste foi realizado em triplicata para efeito de repetibilidade (Figura 34).

Figura 34 - Teste de escoamento central

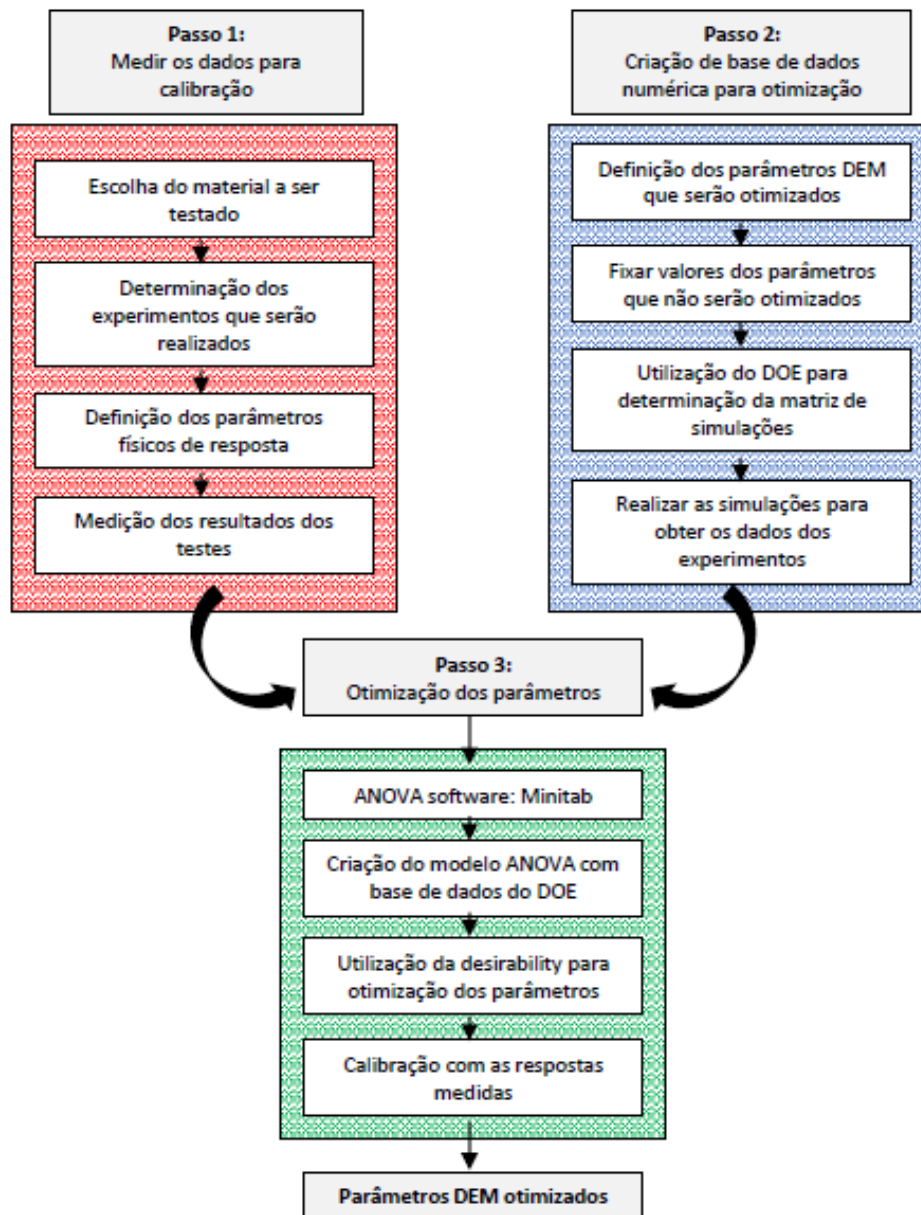


Fonte – Acervo do autor.

O *software* utilizado nesta dissertação foi o simulador Rocky DEM 4.3, fornecido pela ESSS Company (*Engineering Simulation and Scientific Software*), com sede na cidade de Florianópolis, Brasil (ROCKY DEM, 2020). O *software* possui uma interface amigável e conta com vários modelos de interação entre partículas. Neste trabalho, o modelo de contato utilizado nas simulações foi o de histerese linear para cálculo das forças normais e o atrito de Coulomb para cálculo das forças tangenciais. Devido ao comportamento coesivo característico da amostra, também foi utilizado um modelo de adesão entre partículas, calculado de acordo com a distância entre partículas e a força de atração dependente da massa das partículas em contato (modelo de adesão constante) (ILIC, 2013; ILIC; ROBERTS; WHEELER, 2019). Ambos os modelos são implementados no Rocky DEM.

Foram utilizadas ferramentas estatísticas para parametrização e otimização do modelo DEM (JOHNSTONE, 2010). A Figura 31 ilustra o passo a passo do processo de calibração.

Figura 35 - Fluxo de otimização dos parâmetros DEM



Fonte – Modificado de Johnstone (2010).

Para as simulações DEM, um conjunto de parâmetros deve ser definido para representar o comportamento real do material no sistema (BARRIOS et al., 2013). Baseado nas simulações DEM para detecção de viés em amostradores (CLEARY; ROBINSON, 2011b) e estudos sobre as características dos fluxos de materiais particulados (ILIC, 2013, 2019; ILIC; ROBERTS; WHEELER, 2019), alguns parâmetros foram fixados com base nas premissas a seguir:

- O módulo elástico (módulo de Young) para as partículas foi de $1e7 \text{ N/m}^2$, e para os outros elementos do sistema foi de $1e11 \text{ N/m}^2$;
- O modelo de adesão constante foi utilizado e a força de atração definida com base em $\frac{1}{2}$ diâmetro do tamanho do menor grupo de partículas simuladas;
- O coeficiente de restituição para todas as partículas e todos os tipos de interação foi de 0,3;
- Os coeficientes de atrito para as interações entre partícula e correia foram de 0,7;
- Os coeficientes de atrito para as interações entre partícula e outros elementos do sistema foram de 0,5;

Semelhante à aplicação do DEM na prática, a calibração também é um tópico amplamente investigado e discutido pela comunidade científica, no entanto, para este trabalho, não será foco das análises. Os principais parâmetros de calibração para modelagem das interações entre partículas no Rocky 4.3 e propostas no estudo foram:

- Coeficiente de atrito (estático/dinâmico);
- Coeficiente de rolamento;
- Força de atração;
- Tamanho das partículas;
- Forma das partículas.

A distribuição granulométrica das partículas usada nas simulações DEM foi semelhante a distribuição granulométrica das partículas do material britado testado em laboratório e manuseado na prática. Aqui, foram definidos cinco grupos de tamanho de partículas, equivalentes aos tamanhos de 100%, 95%, 80%, 50% e 25% passantes (P_{100} , P_{95} , P_{80} , P_{50} e P_{25}) relacionados a amostra original testada em laboratório (os resultados serão mostrados na seção 6.1). Devido ao tempo computacional requerido e capacidade de processamento limitado nos computadores disponíveis para o estudo, partículas abaixo de 2,5 mm não foram modeladas.

A forma das partículas foi considerada esférica para todas as simulações. Duas razões práticas para definição do uso de esferas para o trabalho foram: (i) o tempo de processamento das simulações (devido ao pequeno tamanho das partículas simuladas) e (ii) a comparação com os trabalhos de Pierre Gy. As simulações demorariam aproximadamente quatro vezes mais tempo na versão utilizada do *software* Rocky DEM, caso se optasse pela simulação com formas diferente de esferas. Para as simulações DEM, considerou-se que o comportamento real das partículas pode ser aproximado ajustando a calibração dos parâmetros do modelo de contato, provendo parâmetros ideais que representem o comportamento do fluxo particulado obtido nos vários experimentos em escala laboratorial. Exemplo disso é a calibração adequada do coeficiente de rolamento, sendo capaz de simular a resistência ao rolamento para as partículas esféricas, comportando-se de maneira semelhante às partículas reais de formato irregular. Este tipo de abordagem tem sido utilizada por vários autores no campo de simulação de elementos discretos e tem demonstrado a produção de resultados válidos (WENSRICH; KATTERFELD, 2012; MOHAJERI et al., 2020; LOMMEN et al., 2019; SILVA et al., 2018).

Os coeficientes de atrito e rolamento são os parâmetros mais impactantes no comportamento físico de materiais não coesivos (WENSRICH; KATTERFELD, 2012). No entanto, coesão e adesão estão diretamente relacionadas à umidade do material e à presença de partículas finas (AJMAL et al., 2020; ROESSLER; KATTERFELD, 2019). A modelagem das interações entre partículas foi então obtida com base nas calibrações dos coeficientes de atrito, coeficiente de rolamento e força de atração, representados pelos parâmetros físicos obtidos nos testes de laboratório.

Para reduzir o número de simulações para calibração do modelo de contato entre partículas, foi utilizado a ferramenta estatística DOE (*“design of experiments”* ou planejamento de experimento). O DOE é um método de otimização estatística para determinar relações entre fatores (variáveis independentes) e respostas (variáveis dependentes). Para este trabalho, foi escolhido o planejamento fatorial completo (FFD), que é o mais indicado para análise de três variáveis ou mais (ANTONY, 2014). Esta abordagem baseia-se em pesquisas acadêmicas anteriores sobre o uso de DOE na calibração DEM (EL KASSEM et al., 2021; HORN, 2012; JOHNSTONE, 2010).

O procedimento para condução do DOE começa com a identificação das respostas medidas, obtidas através das mudanças nos níveis das variáveis de entrada. Para cada variável independente, são definidos níveis que representam a faixa de variação em que se deseja estudar. Geralmente são definidos níveis baixos e altos em que possa ser observada a sensibilidade da variável de entrada na resposta medida.

É relativamente simples determinar a relação entre um único parâmetro e uma variável resposta. Variando o parâmetro em níveis desejados entre um valor baixo e alto, uma curva resposta é criada. Essa curva pode ser usada para prever qual valor do parâmetro DEM é necessário para produzir a resposta desejada. Quando o número de parâmetros DEM e as respostas estudadas aumentam, o número de simulações necessárias para produzir todas as combinações possíveis também aumenta exponencialmente. Para representação de efeitos lineares, dois níveis são adequados para descrever a curva. No presente trabalho, os níveis baixo e alto foram definidos baseados em estudos prévios de calibração de materiais particulados, especificamente para os parâmetros DEM avaliados: coeficiente de atrito, coeficiente de rolamento e forças de atração (ILIC, 2013). A Tabela 1 mostra os níveis adotados.

Tabela 1 – Níveis baixos e altos adotados para montagem do experimento fatorial

Parâmetros	Nível	
	Baixo	Alto
Coeficiente de atrito (μ_a)	0,10	0,90
Coeficiente de rolamento (μ_r)	0,10	0,90
Força de atração (f_a)	0,50	1,00

Fonte – Acervo do autor.

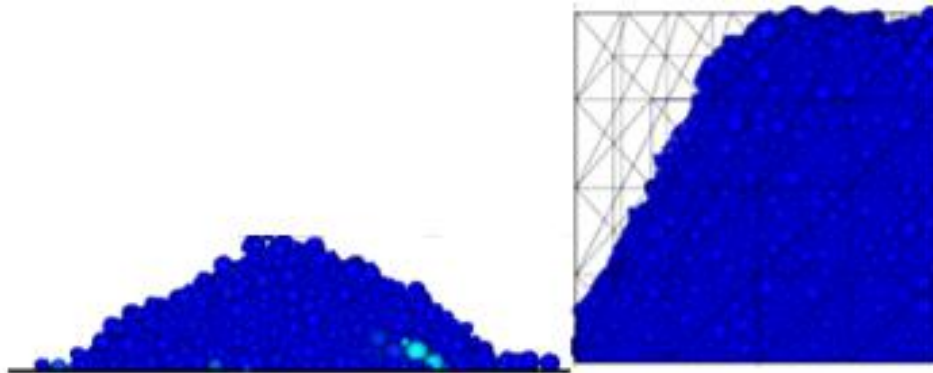
Foram gerados 16 testes na matriz do DOE para cada um dos 3 ensaios de laboratório realizados, resultando em um total de 48 simulações DEM para calibração dos parâmetros do modelo de contato. A Tabela 2 ilustra a matriz do experimento fatorial e a Figura 36 apresenta os testes configurados no Rocky DEM.

Tabela 2 - Planejamento do experimento fatorial

Nº Teste	Parâmetros DEM		
	Coeficiente de rolamento (μ_r)	Coeficiente de atrito (μ_a)	Força de atração (f_a)
1	0,90	0,90	0,50
2	0,10	0,90	1,00
3	0,10	0,10	1,00
4	0,10	0,90	0,50
5	0,90	0,10	1,00
6	0,10	0,90	1,00
7	0,90	0,90	1,00
8	0,90	0,90	0,50
9	0,10	0,10	0,50
10	0,90	0,90	1,00
11	0,10	0,10	1,00
12	0,90	0,10	1,00
13	0,90	0,10	0,50
14	0,10	0,10	0,50
15	0,90	0,10	0,50
16	0,10	0,90	0,50

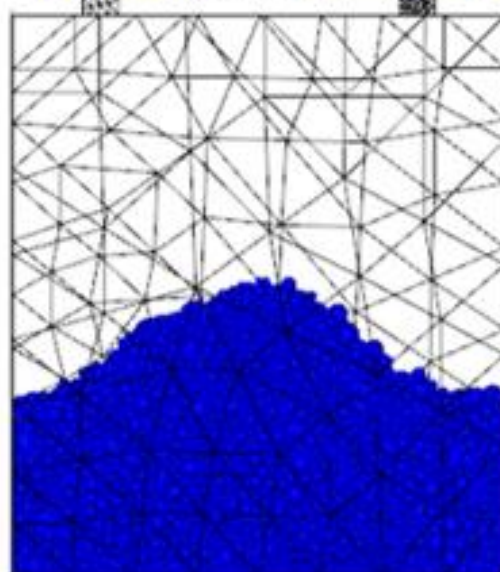
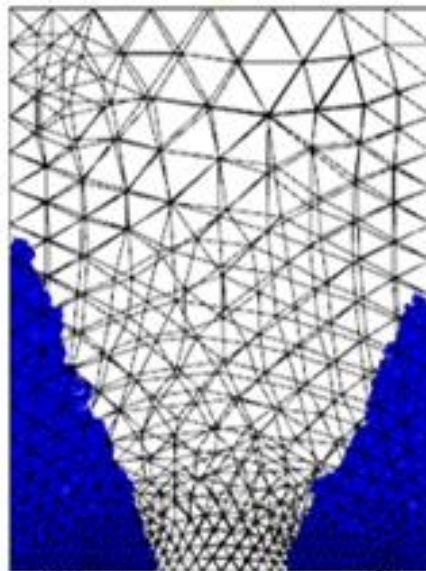
Fonte – Acervo do autor.

Figura 36 - a) Teste de escoamento livre; b) Teste de escoamento em caixa; c) Teste de escoamento central



a)

b)



c)

Após realização dos testes para calibração, os parâmetros DEM foram otimizados a partir da ferramenta ANOVA do Minitab. A partir do modelo de contato devidamente calibrado, 75 simulações foram realizadas para avaliação de cinco diferentes parâmetros da teoria da amostragem, listados a seguir:

- Abertura das facas do amostrador (A);
- Ângulo da calha do amostrador (α);
- Ângulo das facas do amostrador (γ);
- Velocidade do amostrador ($V_{m\acute{a}x}$);
- Vazão de sólidos pelo amostrador (Q).

Para cada uma das variáveis foram analisados 5 níveis, conforme apresentado na Tabela 3. Adicionalmente, todas as simulações foram realizadas em triplicata, inclusive as simulações considerando a configuração original do sistema (descrita anteriormente na Seção 4.4).

Tabela 3 - Determinação dos níveis para cada parâmetro simulado

Níveis	Abertura das facas do amostrador (mm)	Velocidade do amostrador (cm/s)	Ângulo da calha do amostrador (°)	Angulo da faca do amostrador (°)	Vazão de sólidos (t/h)
1	15 (1D)	45	20	1	60
2	22,5 (1,5D)	60	30	20	73
3	30 (2D)	75	40	35	90
4	45 (3D)	90	50	50	105
5	60 (4D)	105	60	70	120

Fonte – Acervo do autor.

A equação da extração foi usada para quantificar o percentual de extração para cada grupo de partículas (CLEARY; ROBINSON; SINNOTT, 2005). A extração foi baseada de forma percentual para cada grupo de partículas a partir da distribuição granulométrica inicial simulada e após amostragem. A equação compara o percentual em massa de um determinado grupo de partículas coletado na amostra e o percentual desse grupo na massa original do lote. A equação é representada abaixo.

$$E_j = \frac{\left(\frac{m_{g,s}}{m_s}\right)}{\left(\frac{m_{g,l}}{m_l}\right)} * 100 \quad (27)$$

Onde:

j é o grupo de partículas;

$m_{g,l}$ é a massa inicial do grupo no lote;

m_l é a massa do lote;

$m_{g,s}$ é a massa do grupo na amostra;

m_s é a massa da amostra.

Todos os testes foram realizados em triplicata e os resultados representados como a média dos três testes.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

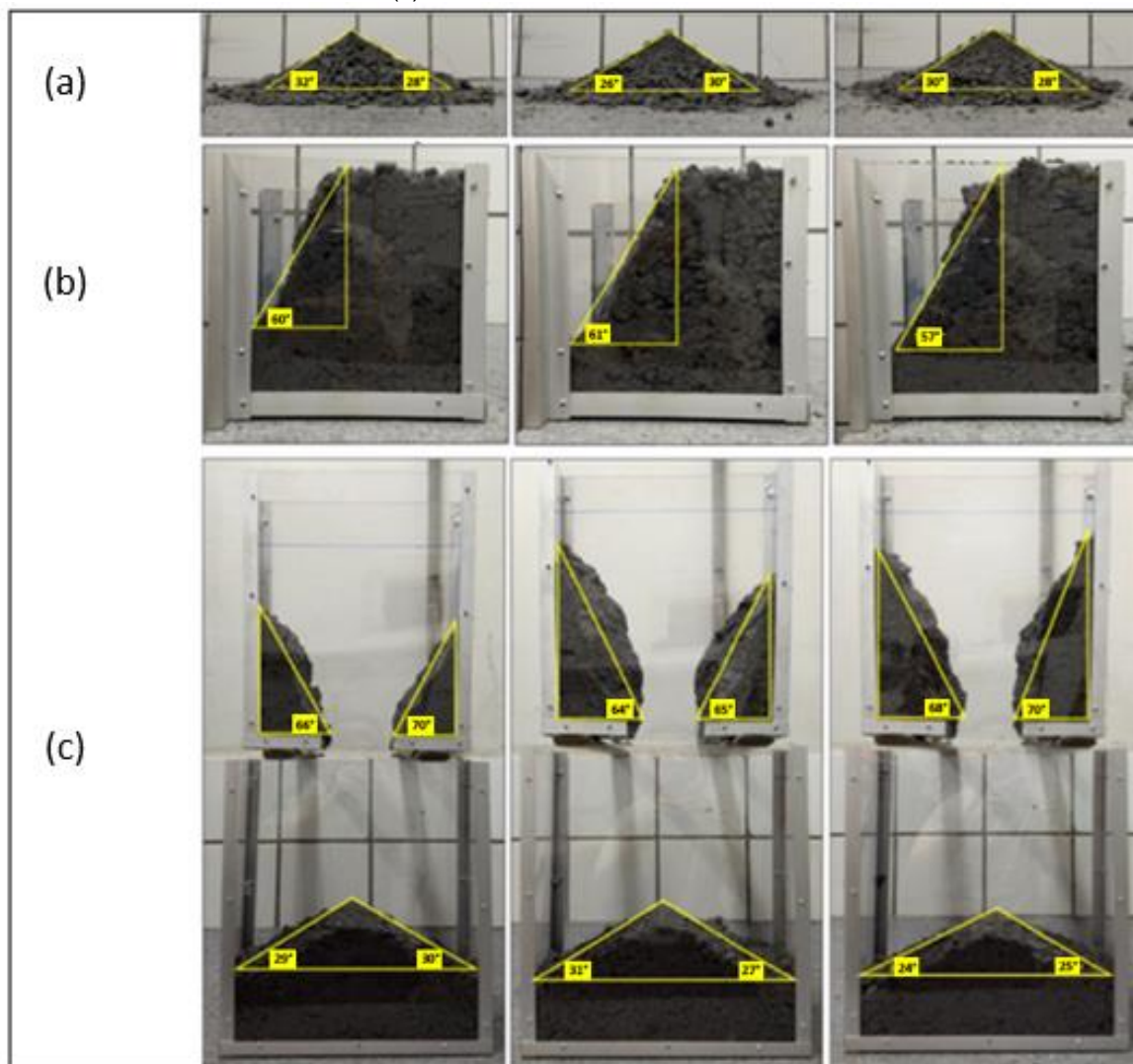
A Tabela 4 apresenta o resumo dos resultados dos testes, enquanto a Figura 37 ilustra os testes de laboratório para obtenção do ângulo de atrito interno e do ângulo de repouso. O teste de escoamento livre forneceu os resultados para o ângulo de repouso, variando entre 26° e 32°, enquanto o teste de escoamento em caixa determinou o ângulo de atrito interno, variando entre 57° e 61°, apresentando o perfil do material bastante semelhante para todos os testes. Finalmente, o teste de escoamento central apresentou ângulos de repouso similares aos obtidos no teste de escoamento livre, enquanto o ângulo de atrito interno resultou em valores ligeiramente maiores (66°-70°) quando comparados com os obtidos pelo teste de escoamento em caixa. Todos os testes foram realizados em triplicata e os resultados refletem a média dos três ensaios. Os ângulos dos testes foram mensurados em campo com auxílio de régua e transferidor de ângulos.

Tabela 4 - Resumo dos resultados dos testes de laboratório

Parâmetros	Unidade	Valor	Desvio padrão
Umidade (%)	%	2,30	0,16
Densidade aparente	g/cm ³	1,70	0,10
Densidade relativa	g/cm ³	2,83	0,01
Ângulo de repouso (Escoamento livre)	°	29	1,91
Ângulo de atrito interno (Escoamento em caixa)	°	59	2,08
Ângulo de repouso (Escoamento central)	°	28	2,80
Ângulo de atrito interno (Escoamento central)	°	67	2,56

Fonte – Acervo do autor.

Figura 37 - Resultados para (a) teste de escoamento livre; (b) teste de escoamento em caixa; e (c) teste de escoamento central



Fonte – Acervo do autor.

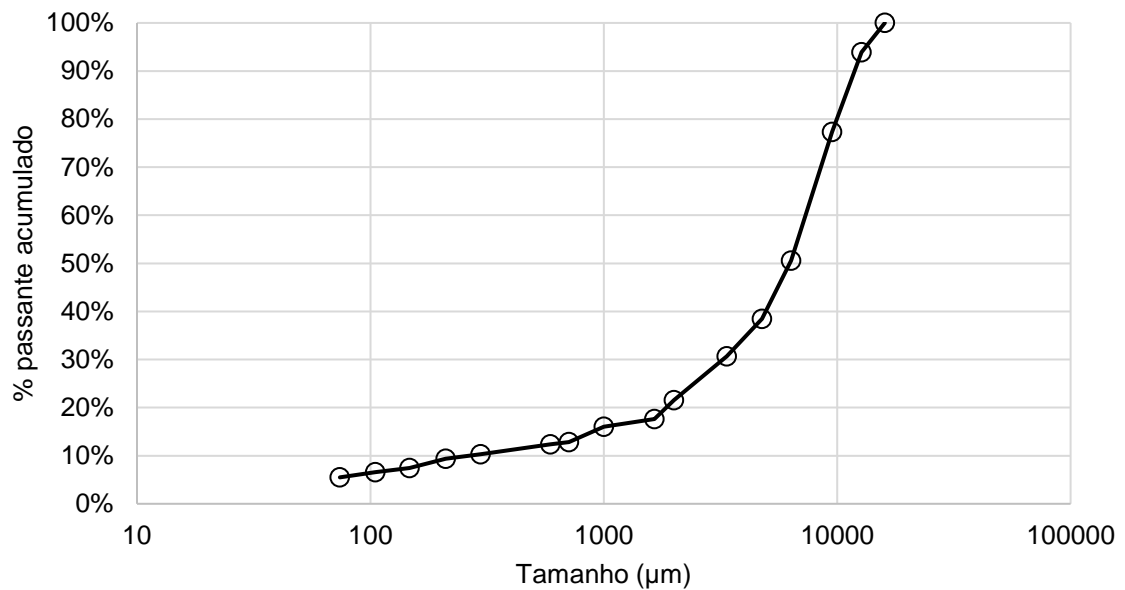
As análises químicas de ouro por faixa granulométrica mostraram uma progressiva concentração do ouro com a redução do tamanho das partículas (Tabela 5). A curva granulométrica completa da amostra é mostrada na Figura 38.

Tabela 5 – Resumo da distribuição granulométrica e teor de ouro por grupo de partícula

Grupo de partícula	Passante	Tamanho	Distribuição de massa		Teor de ouro
			%	mm	
n°	%	mm	%		g/t
1	100	15,0	5		1,98
2	95	13,3	15		2,23
3	80	10,0	30		2,77
4	50	6,3	25		2,47
5	25	2,5	25		3,54

Fonte – Acervo do autor.

Figura 38 - Distribuição granulométrica da amostra do produto britado



Fonte – Acervo do autor.

6.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO DE CONTATO

Com base na distribuição granulométrica da amostra, percebe-se que 25% das partículas são consideradas finas (< 2,5mm) para simulação no *software* Rocky DEM. Essa população geraria muitas partículas no sistema para serem simuladas, sendo necessários computadores não convencionais de alta capacidade de processamento e grandes tempos de simulação. Conseqüentemente, o menor grupo de partículas foi limitado ao tamanho de 2,5 mm. Para reduzir o número de testes para a calibração e, conseqüentemente, otimizar a tempo de simulação, adotou-se a ferramenta DOE disponível no Minitab.

Foi realizado o experimento fatorial completo (FFD), gerando uma matriz com 16 testes. Os resultados são mostrados na Tabela 6, enquanto o planejamento fatorial foi previamente discutido na Seção 5.

Tabela 6 - Parâmetros resposta da matriz DOE

Nº Teste	Teste de escoamento em caixa	Teste de escoamento livre	Teste de escoamento central	
	Ângulo de atrito interno (°)	Ângulo de repouso (°)	Ângulo de atrito interno (°)	Ângulo de repouso (°)
1	65	34	64	41
2	36	24	48	32
3	28	15	31	22
4	35	13	45	32
5	32	24	36	26
6	37	22	42	37
7	90	32	70	50
8	64	33	65	40
9	26	12	28	23
10	90	27	70	50
11	28	17	32	24
12	32	27	39	27
13	30	23	32	25
14	25	13	31	26
15	32	22	36	23
16	35	16	43	30

Fonte – Acervo do autor.

6.2.1 Análise do experimento fatorial

A análise de variância (ANOVA) é usada para testar diferenças significativas entre médias, comparando variâncias. Mais especificamente, dividindo a variação total em diferentes fontes, é possível comparar a variância proveniente da variabilidade entre os grupos com a variância proveniente da variabilidade dentro de um próprio grupo. A determinação dos parâmetros DEM para otimização do modelo dependerá da análise ANOVA utilizada e sua aderência às respostas obtidas nos testes de laboratório para calibração. De posse dos resultados das simulações para calibração, a análise foi realizada com a criação dos gráficos de Pareto para os efeitos padronizados e a equação da regressão para cada parâmetro físico de resposta.

Os vários parâmetros DEM (variáveis independentes) a serem otimizados podem, a depender do seu *range* de variação, influenciar no modelo ANOVA e gerar vieses no modelo. Conseqüentemente, os dados devem ser tratados previamente com utilização de técnicas estatísticas de transformação de dados para obtenção de

valores normais. O Minitab realiza esse processo automaticamente na análise ANOVA.

Os gráficos de Pareto foram gerados a partir dos dados transformados para cada um dos parâmetros resposta da matriz DOE e são representados pelo ângulo de repouso (teste de escoamento), ângulo de atrito interno (teste de escoamento em caixa), ângulo de repouso (teste de escoamento central) e ângulo de atrito interno (teste de escoamento central), respectivamente, pela Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42.

Figura 39 - Gráfico de Pareto para resposta em ângulo de repouso (teste de escoamento livre)



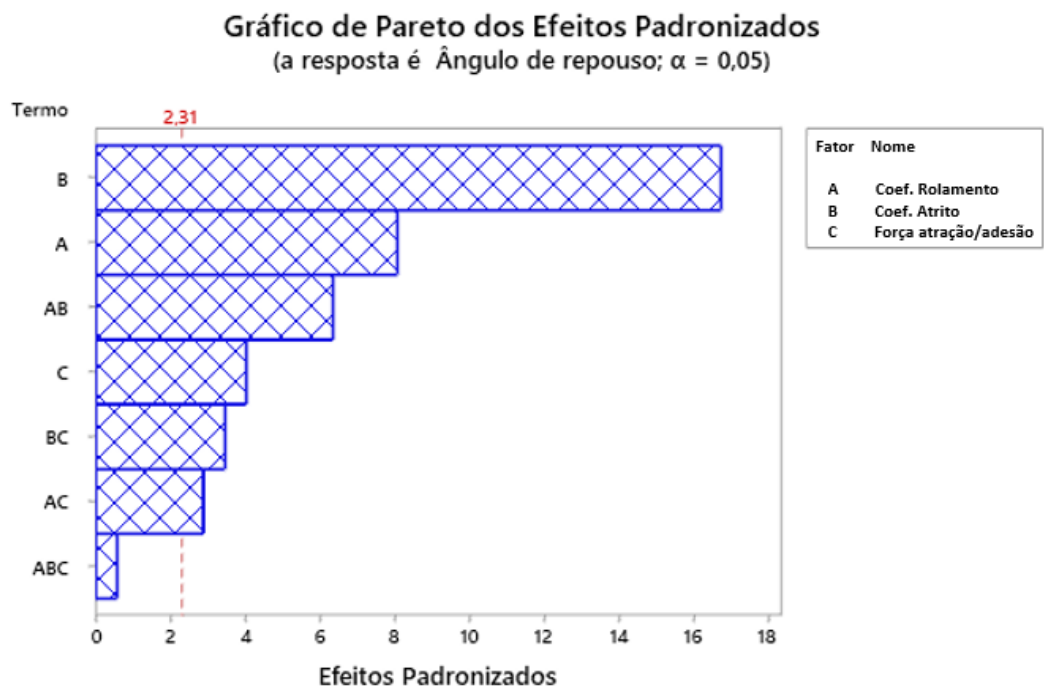
Fonte – Acervo do autor.

Figura 40 - Gráfico de Pareto para resposta em ângulo de atrito interno (teste de escoamento em caixa)



Fonte – Acervo do autor.

Figura 41 - Gráfico de Pareto para resposta em ângulo de repouso (teste de escoamento central)



Fonte – Acervo do autor.

Figura 42 - Gráfico de Pareto para resposta em ângulo de atrito interno (teste de escoamento central)



Fonte – Acervo do autor.

O princípio de Pareto afirma que a maioria das causas pode ser explicada por uma minoria de fatores. O gráfico de Pareto mostra a intensidade dos efeitos que cada uma das variáveis e a interação entre elas causa na variável resposta. O gráfico também apresenta a linha de referência para indicar se os efeitos são estatisticamente significantes. A linha de referência para significância estatística depende do nível de confiança (denotado por α ou alfa). Nos gráficos de Pareto, as barras que cruzam a linha de referência são estatisticamente significativas ao nível de 95%.

Percebe-se pelos gráficos de Pareto que o coeficiente de atrito e coeficiente de rolamento, representados pelas letras B e A, respectivamente, são os fatores mais influentes nas mudanças no ângulo de repouso e ângulo de atrito interno. Esses resultados corroboram o estudo realizado por Wensrich e Katterfeld (2012), a respeito da influência dos coeficientes de atrito e rolamento na modelagem DEM. Interações de segunda ordem e a força de atração ou adesão, representada pela letra C, também exercem influências significativas, mas em menor intensidade.

As equações a seguir mostram as regressões obtidas que descrevem as relações entre os termos do modelo e suas respostas para os parâmetros físicos avaliados.

$$\hat{\text{Ângulo de repouso}} \text{ (teste de escoamento livre: } R^2 = 96,61\%) = 8,39 + 9,84 A - 7,03 B + 5,5 C + 32,81 AB + 2,5 AC + 16,25 BC - 37,5 ABC \quad (28)$$

$$\hat{\text{Ângulo de atrito interno}} \text{ (teste de escoamento em caixa: } R^2 = 99,95\%) = 20,79 + 8,98 A + 13,36 B + 6,42 C - 2,34 AB - 11,72 AC - 10,47 BC + 79,69 ABC \quad (29)$$

$$\hat{\text{Ângulo de repouso}} \text{ (teste de escoamento central: } R^2 = 98,14\%) = 26,5 - 6,88 A + 0,62 B - 5,91 C + 12,5 AB + 9,38 AC + 11,88 BC + 6,2 ABC \quad (30)$$

$$\hat{\text{Ângulo de atrito interno}} \text{ (Teste de escoamento central: } R^2 = 98,83\%) = 25,39 + 1,72 A + 17,34 B + 3,97 C + 20,3 AB + 2,81 AC - 3,44 BC + 9,4 ABC \quad (31)$$

Onde:

A é o coeficiente de rolamento (μ_r);

B é o coeficiente de atrito (μ_a);

C é a força de atração ou adesão (f_a).

As equações de regressão acima, descrevem a relação entre a resposta e os termos do modelo. As constantes foram obtidas a partir do ajuste do modelo linear obtido a partir da base de dados do DOE (KOUIDEN, 2017).

6.2.2 Otimização dos parâmetros DEM

A partir do modelo ANOVA gerado, a função *desirability* foi utilizada para otimização das respostas. Neste estudo, o otimizador de resposta do Minitab foi utilizado para definir a combinação de valores para os parâmetros DEM que melhor representam os resultados dos parâmetros físicos dos testes laboratoriais.

A função *desirability* permite a investigação da superfície de resposta produzida, a partir de uma determinada variação nos termos independentes da

equação, dentro dos limites baixo e alto atribuídos para cada variável. A ferramenta buscará prever o valor dos parâmetros físicos do material a partir da combinação de diferentes níveis para cada parâmetro DEM inserido no DOE, especificando a função *desirability* para cada uma das respostas e buscando a combinação ideal para atingimento dos valores resposta definidos no otimizador. É possível também definir restrições para os parâmetros a serem otimizados, evitando o retorno de valores não reais.

Primeiramente, o Minitab calcula uma *desirability* individual para cada resposta a partir de sua importância e peso na análise. Estes valores são combinados para determinar a *desirability* composta, ou global, dos sistemas com várias respostas. Este processo de otimização se baseia na maximização da *desirability* composta que representa uma combinação de valores que predizem de maneira mais próxima os alvos buscados no otimizador. Usando o gráfico de otimização, é possível ajustar os níveis das variáveis e determinar como as mudanças afetam a resposta. A Tabela 7 e a Tabela 8 mostram, respectivamente, os valores alvo para otimização e três combinações de parâmetros (soluções) que apresentaram os mais altos valores de *desirability* composta e que foram replicados no Rocky DEM.

Tabela 7 – Definição dos alvos para o otimizador de resposta

Resposta	Mínimo	Alvo	Máximo
Ângulo de repouso (escoamento livre)	12°	29°	34°
Ângulo de atrito interno (escoamento em caixa)	25°	59°	90°
Ângulo de repouso (escoamento central)	22°	28°	50°
Ângulo de atrito interno (escoamento central)	28°	67°	70°

Fonte – Acervo do autor.

Tabela 8 - Soluções otimizadas

Solução	Parâmetros/Variáveis			<i>Desirability</i> composta
	Coefficiente de rolamento	Coefficiente de atrito	Força de atração	
1	0,89	0,61	0,72	0,79
2	0,69	0,90	0,58	0,78
3	0,62	0,90	0,60	0,76

Fonte – Acervo do autor.

6.2.3 Validação dos parâmetros DEM otimizados

O primeiro passo para a validação das soluções é verificar se de fato os conjuntos de dados obtidos através do otimizador representam os parâmetros físicos dos testes de laboratório. Foram simuladas no *software* Rocky DEM as três soluções propostas pelo otimizador. Os resultados estão resumidos na Tabela 9.

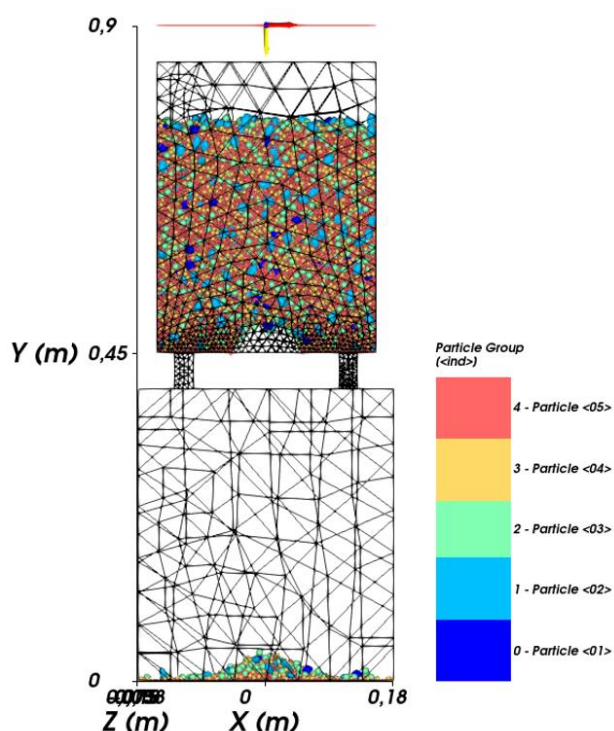
Tabela 9 - Respostas simuladas para as três soluções do otimizador

Resposta	Alvo	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Ângulo de repouso (escoamento livre)	29	32	30	40
Ângulo de atrito interno (escoamento em caixa)	59	61	60	58
Ângulo de repouso (escoamento central)	28	Não houve escoamento do material	28	36
Ângulo de atrito interno (escoamento central)	67		66	65

Fonte – Acervo do autor.

A Solução 2 apresentou os melhores resultados nas simulações DEM. Assumindo valores altos para o coeficiente de rolamento e força de atração, como proposto pela Solução 1, o material não escoou pelo aparato de teste, causando obstrução no orifício de saída da caixa (Figura 43).

Figura 43 - Resultado do teste de escoamento central da Solução 1 ($\mu_r = 0,89$; $\mu_a = 0,61$; $f_a = 0,72$)



Fonte – Acervo do autor.

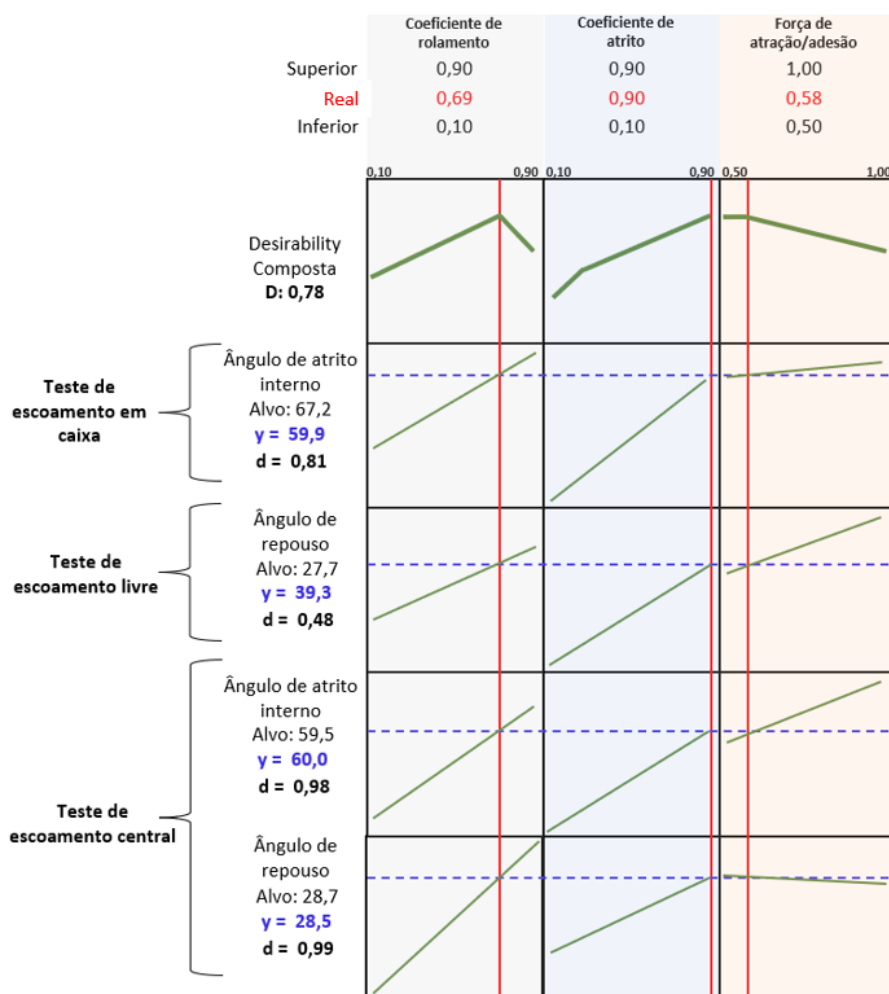
Avaliando a *desirability* individual de cada uma das variáveis (Tabela 10), observa-se que a solução 2 apresenta a maior *desirability* individual para o ângulo de atrito interno no teste de escoamento em caixa, o que indica uma influência maior desse parâmetro para a calibração. A Figura 44 mostra a *desirability* individual da Solução 2 para predição de cada um dos parâmetros físicos dos testes realizados.

Tabela 10 - *Desirability* individual para cada um dos parâmetros das soluções propostas pelo otimizador

Resposta	<i>Desirability</i> individual		
	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Ângulo de repouso (escoamento livre)	0,56	0,48	0,51
Ângulo de atrito interno (escoamento em caixa)	0,70	0,81	0,76
Ângulo de repouso (escoamento central)	0,99	0,99	0,89
Ângulo de atrito interno (escoamento central)	0,99	0,98	0,94

Fonte – Acervo do autor.

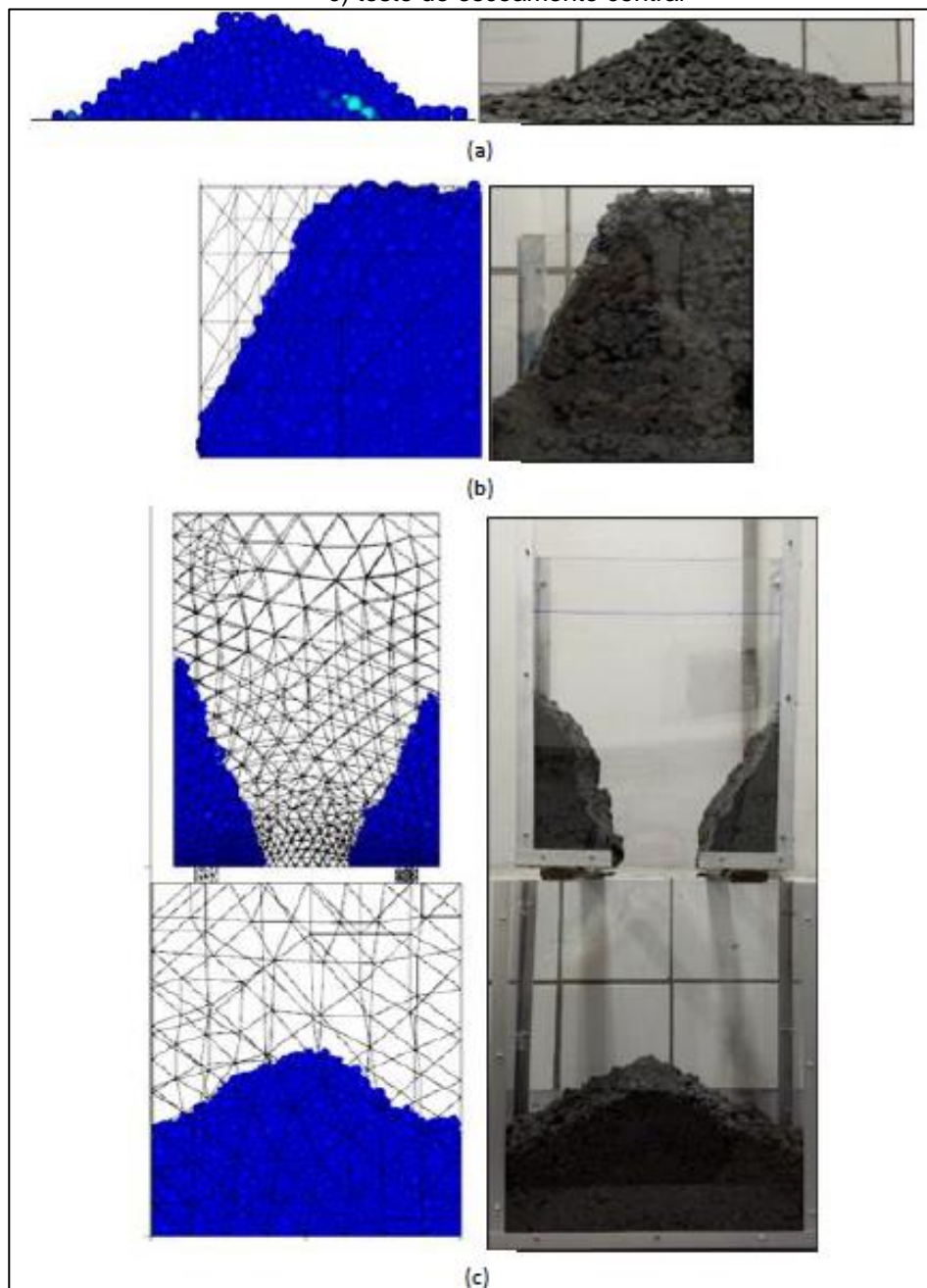
Figura 44 - Curvas *Desirability* para a Solução 2



Fonte – Acervo do autor.

A Figura 45 ilustra o comparativo entre os resultados dos testes de laboratório e as simulações DEM para os parâmetros de contato otimizados pela Solução 2.

Figura 45 - Comparação entre os testes de laboratório e simulações DEM utilizando os parâmetros de contato calibrados (Solução 2): a) teste de escoamento livre; b) teste de escoamento em caixa; e c) teste de escoamento central



Fonte – Acervo do autor.

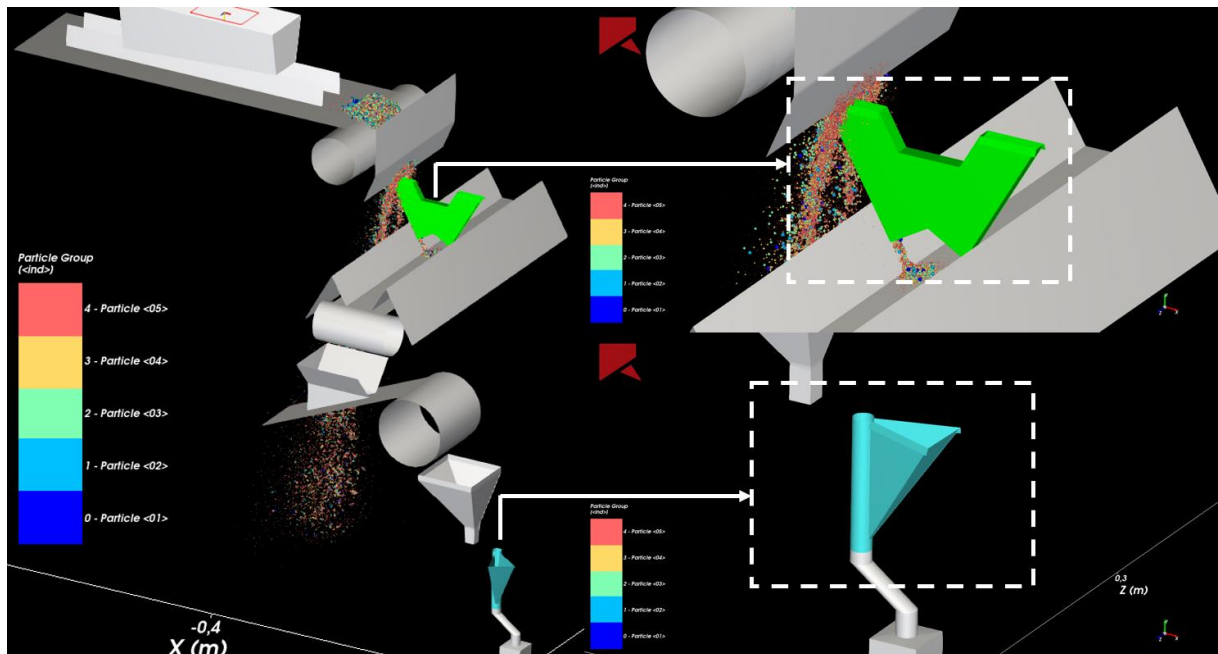
Quando comparadas as simulações calibradas com os parâmetros da Solução 2 às imagens dos testes de laboratório, percebe-se que a calibração DEM para as simulações foi apta a descrever de forma satisfatória os parâmetros físicos e o perfil

do material em cada experimento, em particular para os testes que envolveram grandes volumes de amostra, como é o caso do teste de escoamento em caixa e do teste de escoamento central.

6.3 SIMULAÇÕES E ANÁLISES

As simulações foram realizadas variando um parâmetro por vez, a partir das configurações originais do sistema de amostragem. Todos os parâmetros foram modificados individualmente no amostrador primário e secundário. Conseqüentemente, além de uma avaliação detalhada do erro de extração (IEE) no amostrador primário e secundário, também foi realizada uma avaliação do desempenho geral do sistema de amostragem com identificação de oportunidades de melhoria no sistema e identificação de vieses na amostragem. A Figura 46 mostra a visualização 3D do sistema de amostragem configurado no Rocky DEM e, em detalhe, os amostradores primário e secundário.

Figura 46 - Sistema de amostragem e amostradores primário e secundário

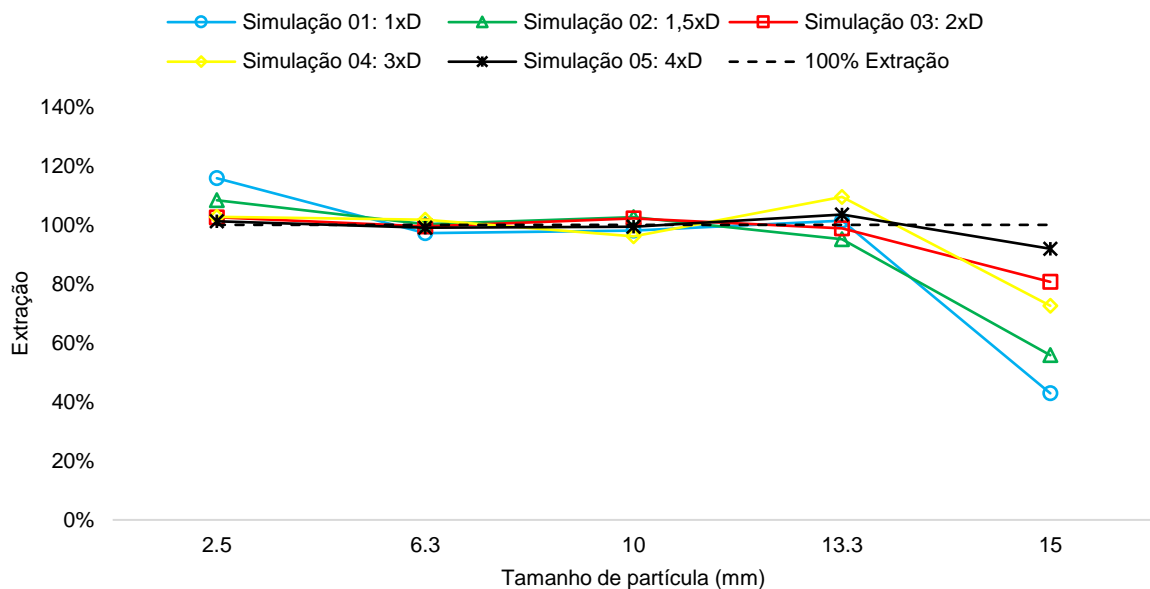


Fonte – Acervo do autor.

6.3.1 Abertura das facas do amostrador

A teoria da amostragem parametriza a abertura mínima das facas do amostrador como 3 vezes o diâmetro da maior partícula do lote, ou d_{95} ou *top size*. A Figura 47 mostra os resultados das simulações variando a abertura das facas do amostrador do amostrador primário.

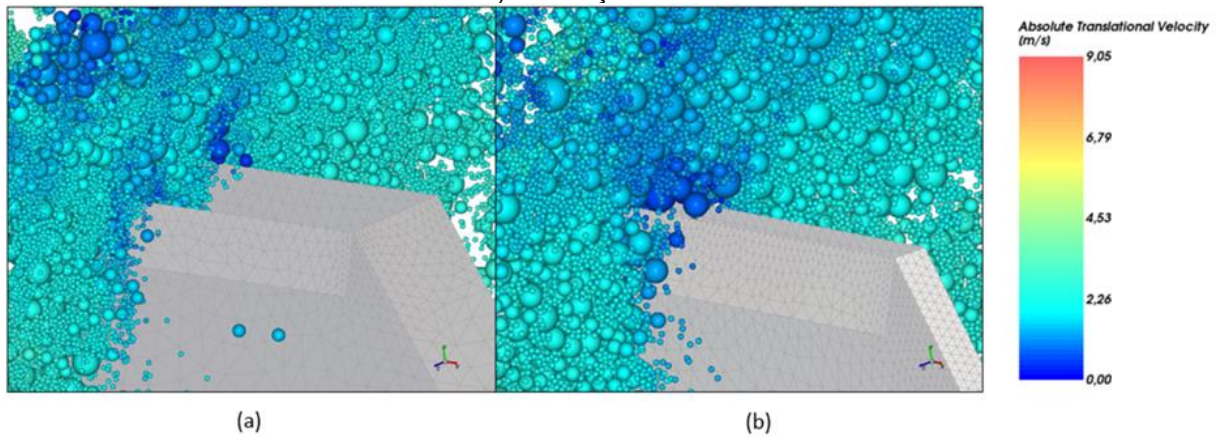
Figura 47 - Extração do amostrador primário em função da abertura das facas do amostrador



Fonte – Acervo do autor.

Nota-se uma redução na extração à medida que a abertura se aproxima do grupo de partículas de maior tamanho. Esse grupo apresenta extração de 42,9% para abertura igual ao seu diâmetro, representada pela Simulação 01. Outro ponto observado na Simulação 01 diz respeito à obstrução do amostrador para pequenas aberturas, como mostrado na Figura 48. Conseqüentemente, uma redução na velocidade do fluxo também é percebida devido à obstrução e à dificuldade de escoamento do material para pequenas aberturas, ocasionando uma seletividade na coleta das partículas do grupo de menor tamanho e gerando extrações acima de 100% para esse grupo, ou seja, o percentual de partículas desse grupo coletada na simulação, extrapola a quantidade em percentual original do lote.

Figura 48 - Vista em foco do amostrador em duas simulações distintas. Velocidade das partículas no topo do amostrador: azul escuro baixa velocidade e azul claro alta velocidade. a) Simulação 05: 4xD; b) Simulação 01: 1xD

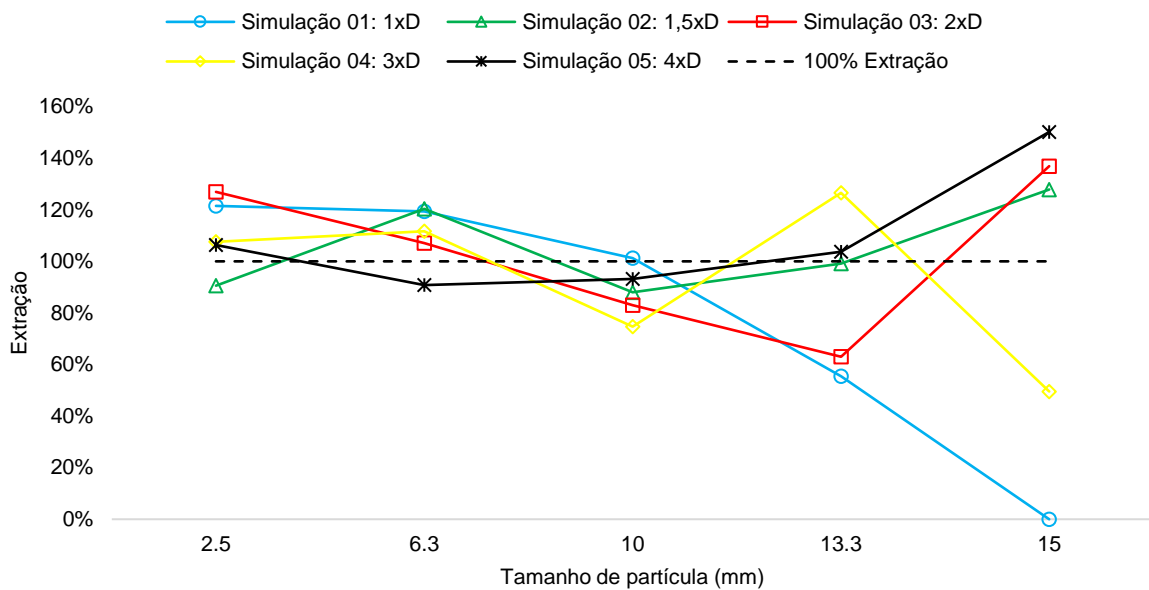


Fonte – Acervo do autor.

Neste caso, extrações superiores a 90% somente foram observadas quando a abertura das facas do amostrador foi de 4 vezes o diâmetro do grupo de partículas maiores (Simulação 05). Essa observação é diretamente comparável aos princípios do dimensionamento de silos baseado no comportamento de materiais particulados (KATTERFELD *et al.*,2021). Com base nesses princípios, visando à prevenção de formação de arco mecânico, a abertura deverá ser de pelo menos 4 vezes o diâmetro da maior partícula ou *top size*.

A Figura 49 mostra a extração para o amostrador secundário em função da abertura das facas do amostrador. O comportamento observado no amostrador primário se repete no amostrador secundário, mostrando baixas extrações para a abertura das facas do amostrador igual ao diâmetro do grupo de partículas maiores. A extração foi de 55,49% para o grupo de partícula de 13,3 mm e de 0% para o grupo de partículas de 15 mm.

Figura 49 - Extração do amostrador secundário em função da abertura das facas do amostrador

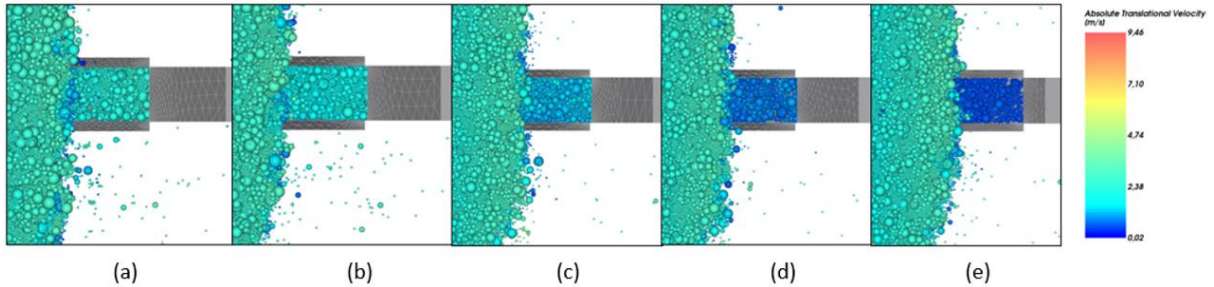


Fonte – Acervo do autor.

6.3.2 Ângulo da calha do amostrador

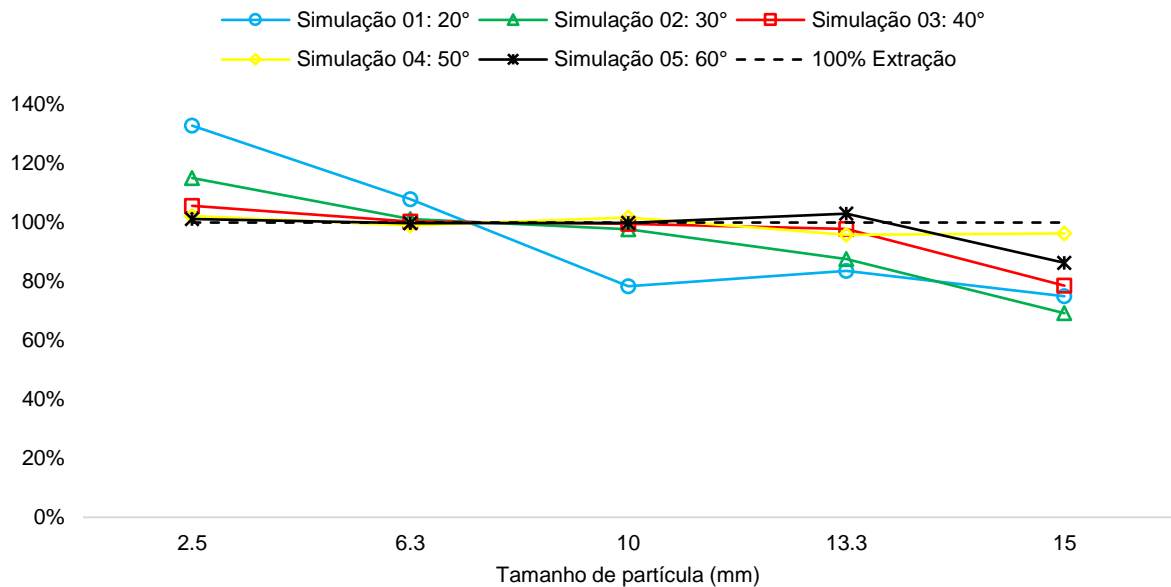
Nas simulações do ângulo da calha do amostrador, o principal problema observado foi a obstrução do amostrador para ângulos inferiores a 50° devido à redução da velocidade do fluxo (Figura 50). De acordo com os resultados experimentais, o ângulo de atrito interno nos dois aparatos testados (teste de escoamento central e teste de escoamento em caixa) apresentou valores acima de 59° . Assim sendo, esses resultados mostram que o critério de seleção do ângulo da calha do amostrador está diretamente relacionado com o ângulo de atrito interno do material a ser manuseado. Este é um achado importante e pode ser integrado à teoria da amostragem de Pierry Gy como uma das recomendações para dimensionamento de equipamentos de amostragem. Esta conclusão também é análoga ao dimensionamento da inclinação mínima para chutes de transferência (ILIC, 2019). A Figura 51 sumariza a extração calculada para as simulações.

Figura 50 - Vista de topo do sistema mostrando as partículas dentro do amostrador. As partículas estão coloridas de acordo suas velocidades, sendo: azul escuro baixa velocidade e azul claro alta velocidade. a) Simulação 05: 60°, b) Simulação 04: 50°, c) Simulação 03: 40°, d) Simulação 02: 30°, e) Simulação 01: 20°



Fonte – Acervo do autor.

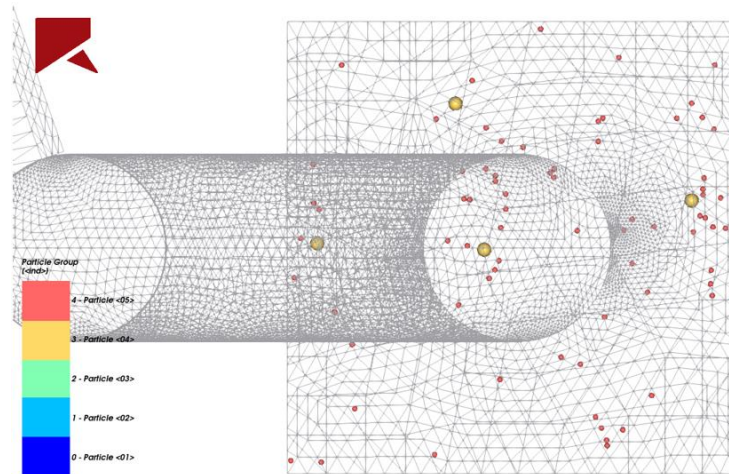
Figura 51 - Extração do amostrador primário em função do ângulo da calha do amostrador



Fonte – Acervo do autor.

Devido à pouca massa de amostra por alíquota coletada pelo amostrador secundário nas simulações para o ângulo da calha do amostrador (Figura 52), julgou-se que a simulação não seria representativa para avaliação desse parâmetro no amostrador secundário.

Figura 52 – Partículas coletadas na alíquota final da Simulação 01: 20° para avaliação do ângulo da calha do amostrador

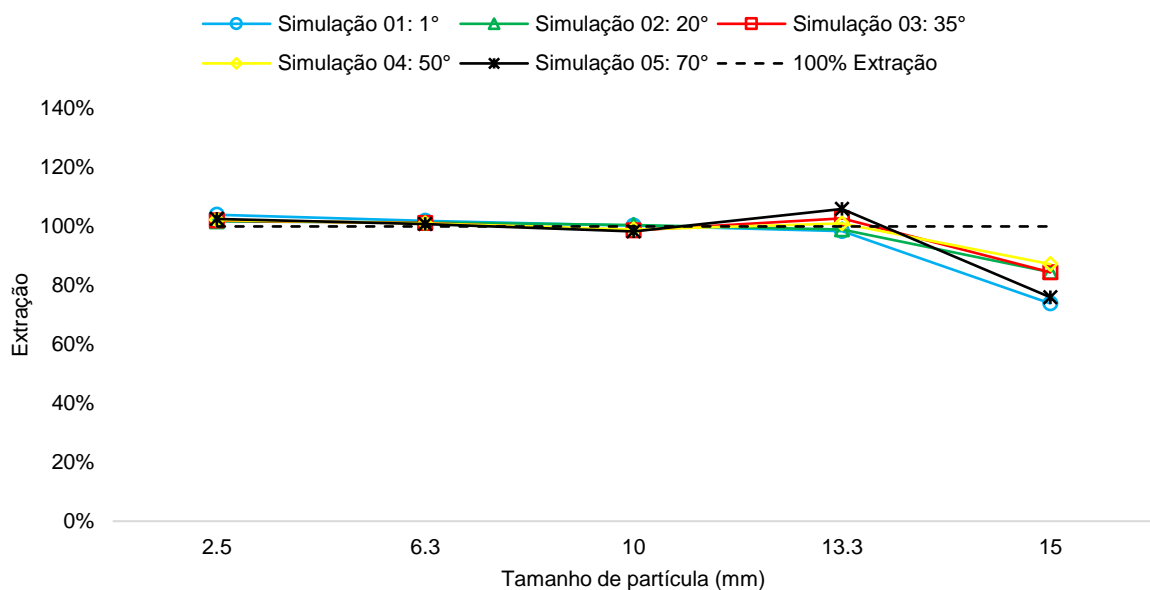


Fonte – Acervo do autor.

6.3.3 Ângulo das facas do amostrador

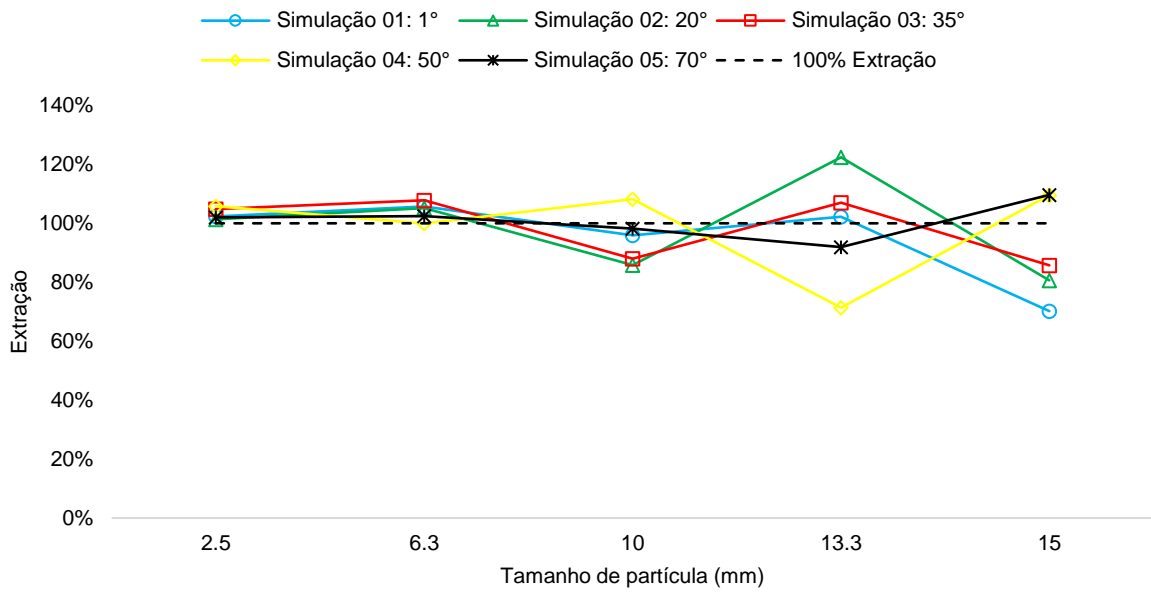
Embora não tenham sido observadas variações significativas para a extração nos grupos de partículas entre 2,5 e 13,3 mm, uma queda na extração para o grupo de partículas de tamanho 15 mm pode ser percebida tanto para o amostrador primário quanto para o secundário (Figura 53 e Figura 54).

Figura 53 - Extração do amostrador primário em função do ângulo das facas do amostrador



Fonte – Acervo do autor.

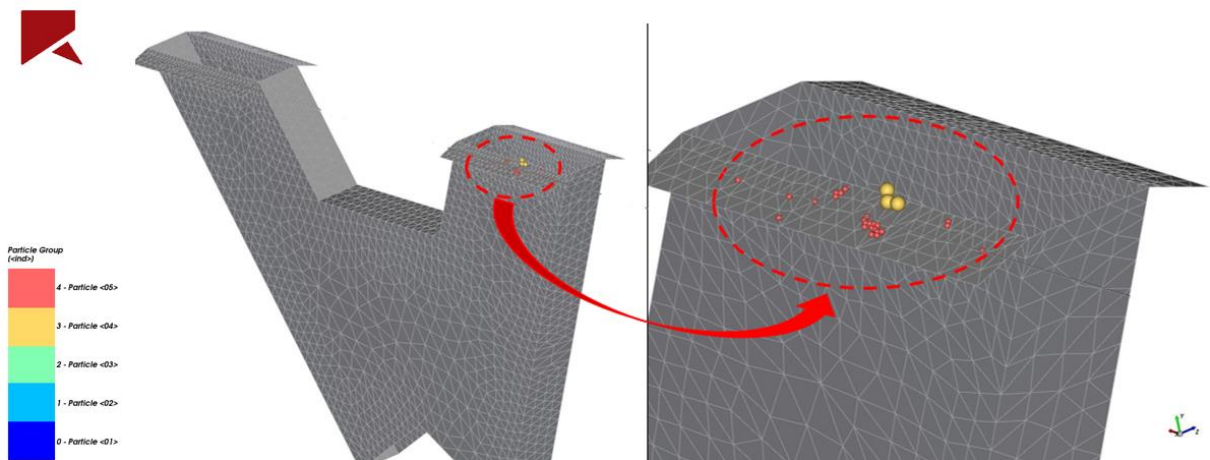
Figura 54 - Extração do amostrador secundário em função do ângulo das facas do amostrador



Fonte – Acervo do autor.

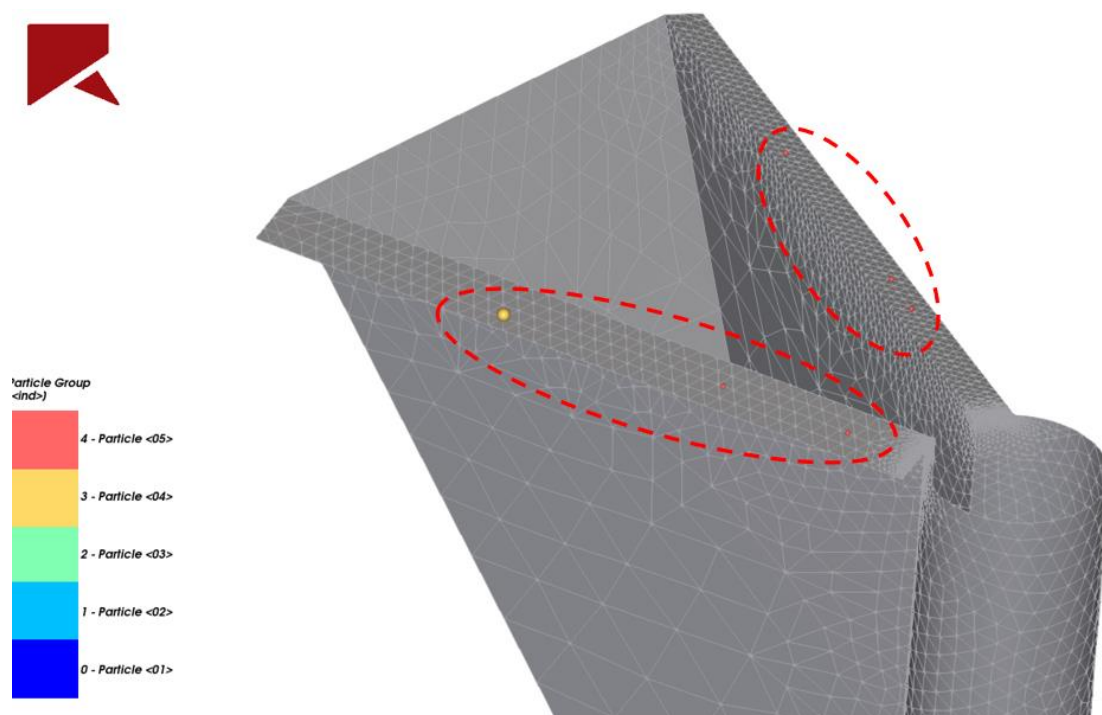
Com a redução do ângulo das facas do amostrador para valores inferiores a 50°, também foi observado acúmulo de material fino sobre a faca do amostrador (Figura 55 e Figura 56), mostrando uma condição inadequada na amostragem, retratada pela Simulação 03.

Figura 55 – Representação da Simulação 03: 35°, mostrando o acúmulo de partículas finas depositadas sobre a faca do amostrador primário. Partículas vermelhas representam o grupo de 2,5 mm e partículas amarelas representam o grupo de 6,3 mm.



Fonte – Acervo do autor.

Figura 56 - Representação da Simulação 03: 35°, mostrando o acúmulo de partículas finas depositadas sobre as facas do amostrador secundário. Partículas vermelhas representam o grupo de 2,5 mm e partículas amarelas representam o grupo de 6,3 mm.



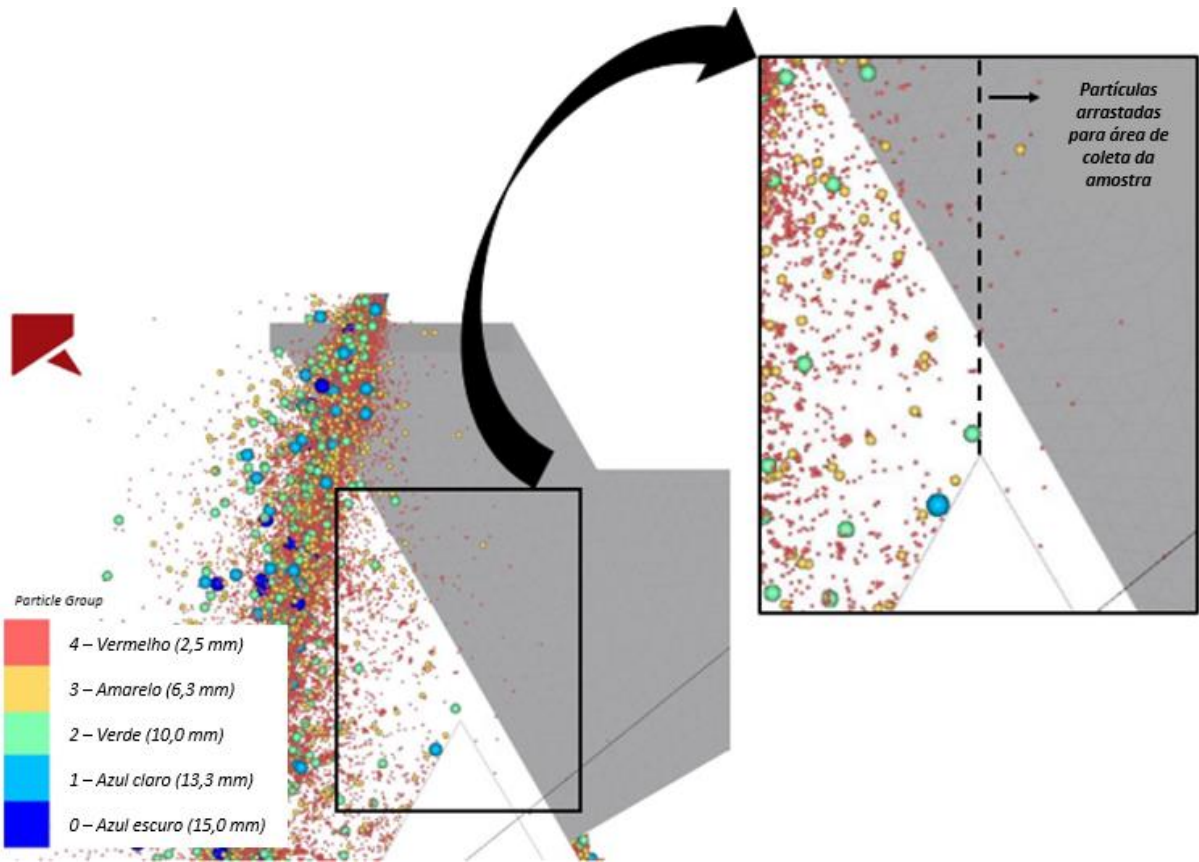
Fonte – Acervo do autor.

Os resultados mostram a relação entre o ângulo de atrito interno e o ângulo mínimo das facas do amostrador, reforçando a discussão da Secção 6.3.2, que também relaciona o ângulo de atrito interno com a inclinação da calha do amostrador e o dimensionamento dos sistemas de amostragem. Devido ao aumento na extração dos grupos de menor tamanho de partícula, foram observadas baixas extrações na fração mais grossa.

6.3.4 Velocidade do amostrador

Com o aumento da velocidade do amostrador primário, foi observada uma projeção de partículas finas que não fazem parte do corte, sendo arrastadas para a amostra. Este efeito se traduz em um erro sistemático, gerando um viés na amostragem (Figura 57).

Figura 57 - Simulação DEM mostrando o efeito de arraste das partículas finas para a amostra. Partículas finas estão representadas em vermelho (2,5 mm) e partículas grossas são representadas em azul escuro (15 mm)

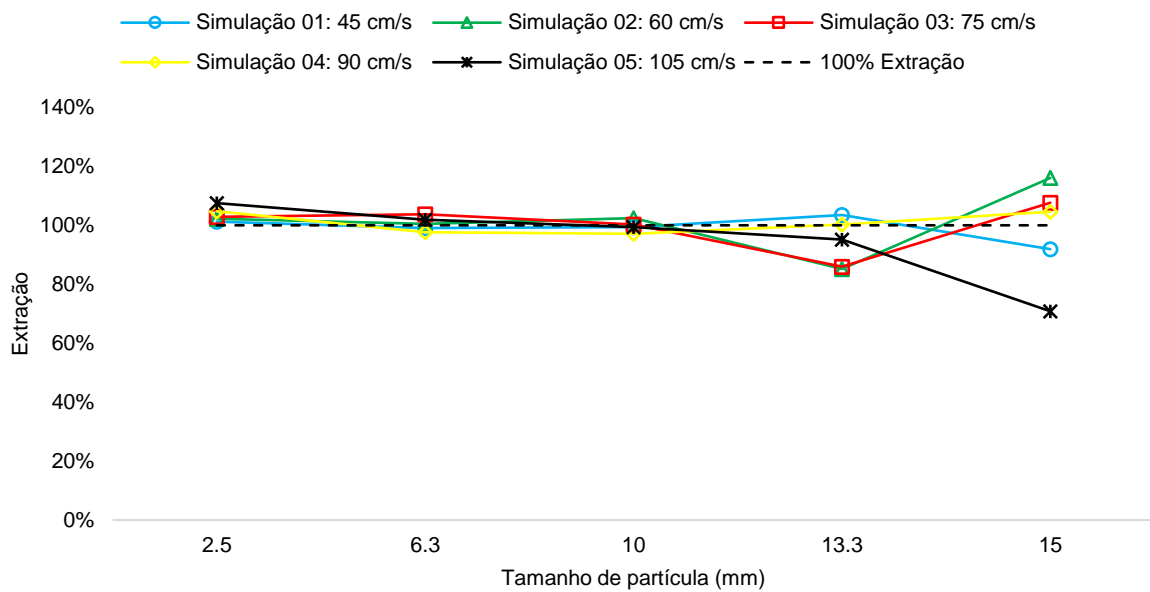


Fonte – Acervo do autor.

O viés também se manifesta pelos resultados apresentados na Figura 58, mostrando uma extração acima de 100% para o grupo de partículas finas (2,5 mm). Os resultados indicam que a velocidade de 45 cm/s (Simulação 01) apresenta os valores mais consistentes para a extração nos cinco grupos de partículas simulados.

Analisando a proporção de massa coletada por grupo e comparando os teores entre o teor real do lote e teor da amostra, um viés de +0,12% relativo no teor de ouro pode ser identificado, resultado da contaminação da amostra por partículas finas com maior concentração de ouro (Tabela 11). Os teores foram obtidos pela análise química das frações granulométricas mostradas na Seção 6.1.

Figura 58 - Extração do amostrador primário em função da velocidade do amostrador



Fonte – Acervo do autor.

Tabela 11 – Comparação entre os teores do lote e da amostra primária

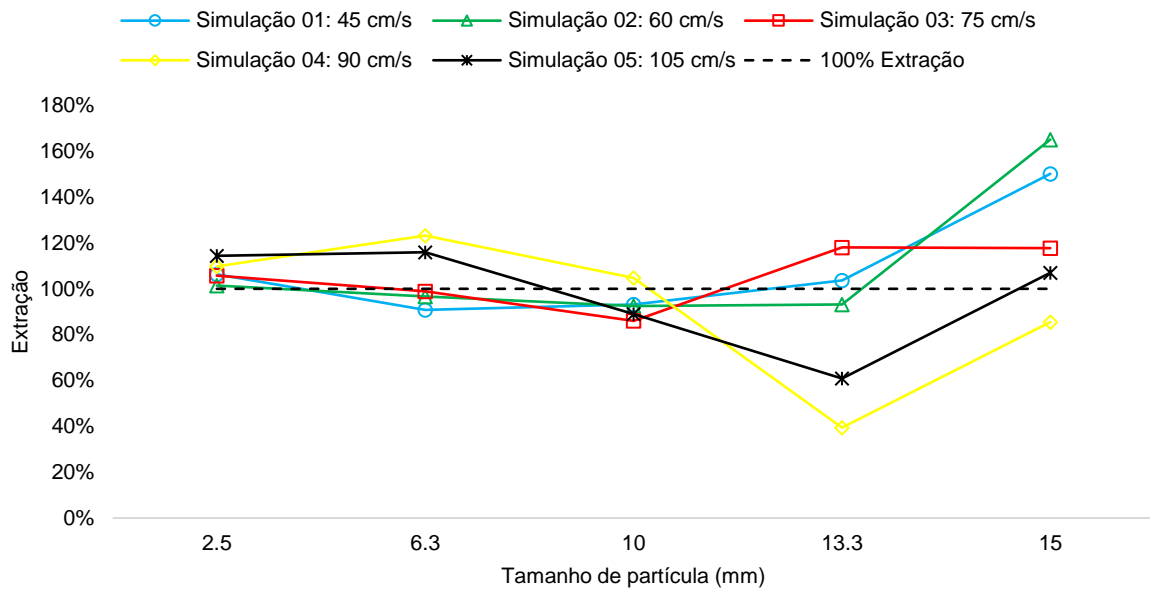
Parâmetro	Lote					Amostra primária				
	2,5	6,3	10	13,3	15	2,5	6,3	10	13,3	15
Tamanho (mm)	2,5	6,3	10	13,3	15	2,5	6,3	10	13,3	15
Distribuição de tamanhos (%)	25,0	25,0	30,0	15,0	5,0	25,3	24,8	29,8	15,5	4,6
Teor (g/t)	3,54	2,47	2,77	2,23	1,98	3,54	2,47	2,77	2,23	1,98
Teor amostra (g/t)	2,767					2,770				

Fonte – Acervo do autor.

Baseando-se nos dados históricos da unidade e nos teores de ouro por fração granulométrica analisados, sabe-se que o ouro tende a se concentrar nas frações finas do minério e, portanto, uma amostragem representativa de cada grupo de tamanho de partículas é de suma importância.

Para o amostrador secundário, velocidades acima de 75 cm/s favoreceram a extração do grupo de partículas de 15 mm (Figura 59). Isto se dá devido ao maior número de incrementos coletados pelo amostrador durante o ciclo de coleta e será mais bem detalhado na Seção 6.3.6.

Figura 59 - Extração do amostrador secundário em função da velocidade do amostrador

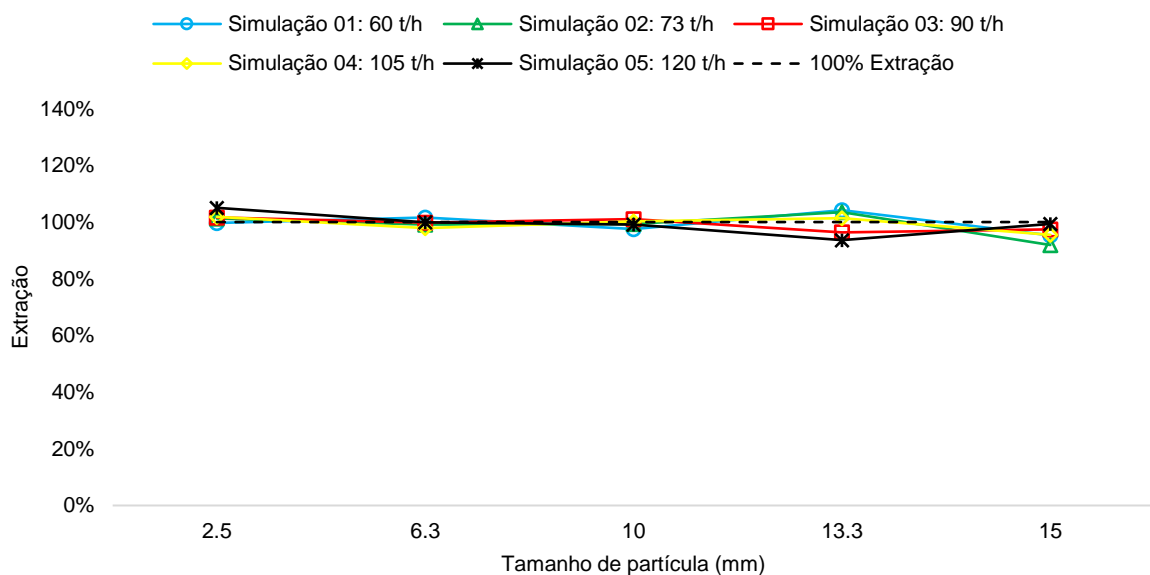


Fonte – Acervo do autor.

6.3.5 Vazão de sólidos no amostrador

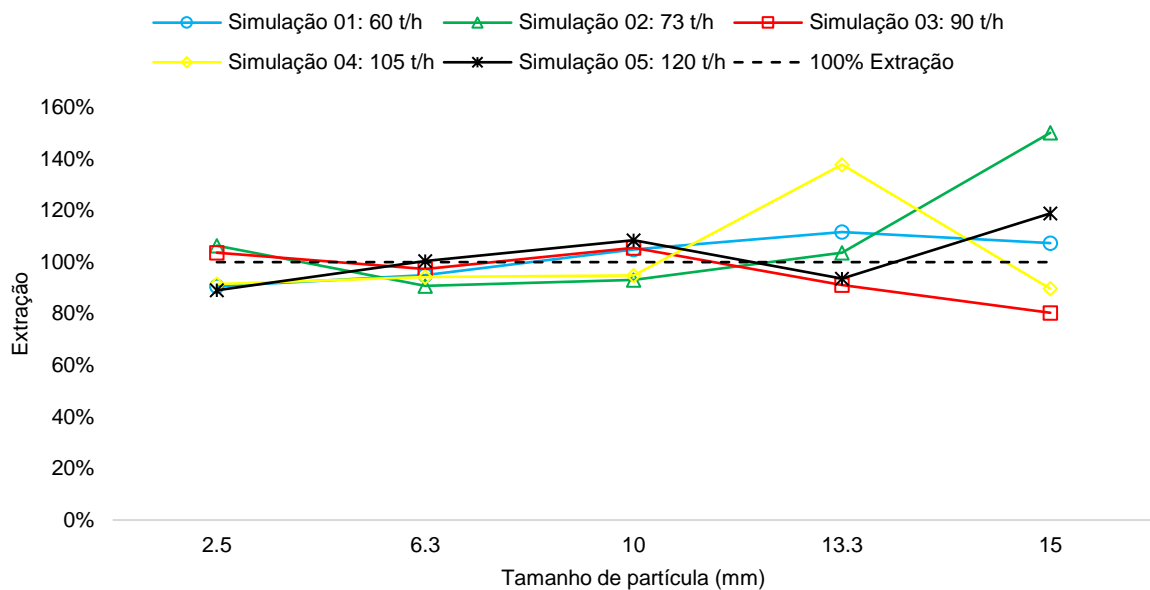
A vazão de sólidos no amostrador está diretamente relacionada com a velocidade com que as partículas entram no coletor. A extração para simulações com variação da vazão de sólidos no amostrador primário e secundário é mostrada abaixo.

Figura 60 - Extração do amostrador primário em função da vazão de sólidos



Fonte – Acervo do autor.

Figura 61 - Extração do amostrador secundário em função da vazão de sólidos



Fonte – Acervo do autor.

Não foram observados vieses ou variações significativas na extração das partículas com o aumento ou a redução da vazão de sólidos no equipamento, mostrando que o amostrador foi bem dimensionado. A principal observação neste caso é que, com o aumento da vazão de sólidos, o problema de arraste de finos para a amostra primária discutido na Seção 6.3.4 pode ser potencializado. Entretanto, este problema aparenta ter uma influência maior da velocidade do amostrador se comparado a vazão de sólidos.

6.3.6 Resumo das simulações

A Tabela 12, Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16 apresentam o resumo das porcentagens de extração por tamanho de partícula para todas as simulações realizadas.

Tabela 12 – Resumo da extração para abertura das facas do amostrador

Simulação	Parâmetro	Amostrador primário					Amostrador secundário				
		Grupo de partículas (mm)					Grupo de partículas (mm)				
		2,5	6,3	10	13,3	15	2,5	6,3	10	13,3	15
1	1xD	116%	97%	98%	101%	43%	122%	119%	101%	55%	0%
2	1,5xD	108%	100%	103%	95%	56%	91%	120%	88%	99%	128%
3	2xD	103%	99%	102%	99%	81%	127%	107%	83%	63%	137%
4	3xD	103%	102%	96%	109%	73%	108%	112%	75%	127%	50%
5	4xD	101%	99%	99%	103%	92%	106%	91%	93%	104%	150%

Fonte – Acervo do autor.

Tabela 13 - Resumo da extração para ângulo da calha do amostrador

Simulação	Parâmetro	Amostrador primário					Amostrador secundário				
		Grupo de partículas (mm)					Grupo de partículas (mm)				
		2,5	6,3	10	13,3	15	2,5	6,3	10	13,3	15
1	20°	133%	108%	78%	84%	75%	-	-	-	-	-
2	30°	115%	101%	98%	88%	69%	-	-	-	-	-
3	40°	106%	100%	100%	98%	79%	-	-	-	-	-
4	50°	102%	99%	102%	96%	96%	-	-	-	-	-
5	60°	101%	100%	100%	103%	86%	-	-	-	-	-

Fonte – Acervo do autor.

Tabela 14 - Resumo da extração para ângulo das facas do amostrador

Simulação	Parâmetro	Amostrador primário					Amostrador secundário				
		Grupo de partículas (mm)					Grupo de partículas (mm)				
		2,5	6,3	10	13,3	15	2,5	6,3	10	13,3	15
1	1°	104%	102%	100%	98%	74%	102%	106%	96%	102%	70%
2	20°	102%	101%	101%	99%	85%	101%	105%	86%	122%	81%
3	35°	102%	101%	99%	103%	84%	105%	108%	88%	107%	86%
4	50°	102%	101%	99%	101%	87%	106%	100%	108%	71%	110%
5	70°	102%	101%	98%	106%	76%	102%	102%	98%	92%	110%

Fonte – Acervo do autor.

Tabela 15 - Resumo da extração para velocidade do amostrador

Simulação	Parâmetro	Amostrador primário					Amostrador secundário				
		Grupo de partículas (mm)					Grupo de partículas (mm)				
		2,5	6,3	10	13,3	15	2,5	6,3	10	13,3	15
1	45 cm/s	101%	99%	99%	103%	92%	106%	91%	93%	104%	150%
2	60 cm/s	102%	101%	102%	85%	116%	101%	97%	92%	93%	165%
3	75 cm/s	103%	104%	100%	86%	108%	106%	99%	86%	118%	118%
4	90 cm/s	105%	98%	97%	100%	105%	110%	123%	105%	39%	85%
5	105 cm/s	108%	102%	99%	95%	71%	114%	116%	89%	61%	107%

Fonte – Acervo do autor.

Tabela 16 - Resumo da extração para vazão de sólidos no amostrador

Simulação	Parâmetro	Amostrador primário					Amostrador secundário				
		Grupo de partículas (mm)					Grupo de partículas (mm)				
		2,5	6,3	10	13,3	15	2,5	6,3	10	13,3	15
1	60 t/h	100%	102%	98%	104%	95%	91%	95%	105%	112%	107%
2	73 t/h	101%	99%	99%	103%	92%	106%	91%	93%	104%	150%
3	90 t/h	102%	100%	101%	96%	97%	104%	97%	106%	91%	80%
4	105 t/h	102%	98%	100%	101%	95%	92%	94%	95%	138%	90%
5	120 t/h	105%	100%	99%	94%	99%	89%	100%	108%	94%	119%

Fonte – Acervo do autor.

6.3.7 Melhorias implementadas a partir das simulações

Um dos pontos observados em todas as simulações realizadas foi a grande variabilidade de extração para o amostrador secundário *Vezein*, no que tange à representação do percentual em peso de cada uma das faixas granulométricas analisadas. Esta variabilidade é potencializada nas frações grossas da amostra. A Tabela 17, resume os valores para a simulação do sistema nas configurações originais de projeto.

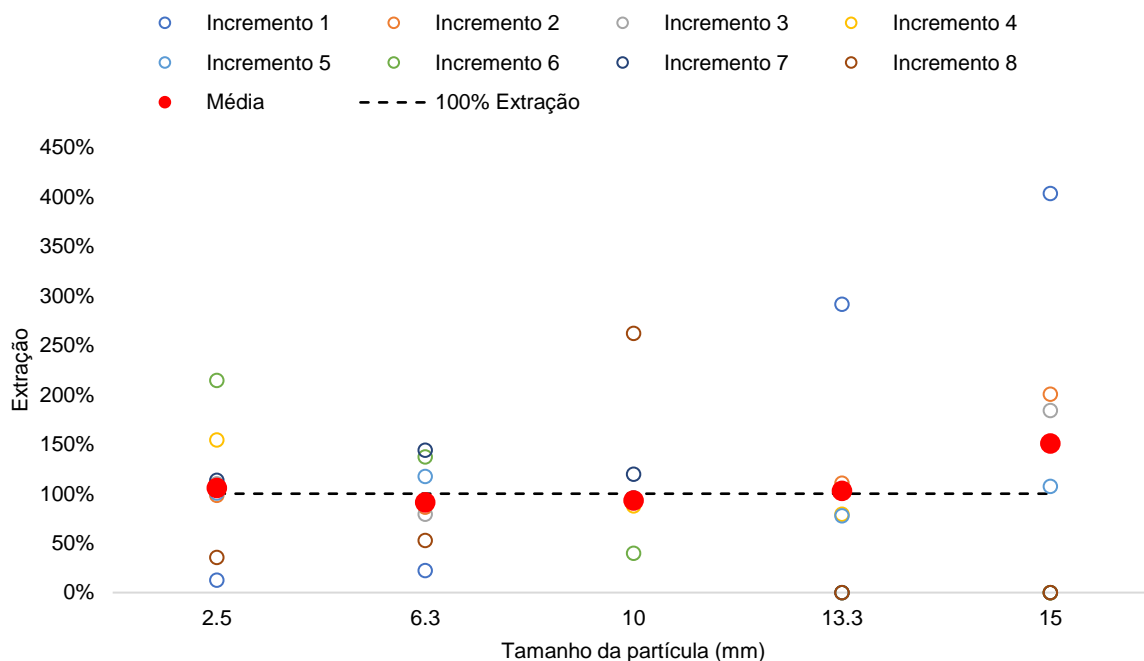
Nessas configurações originais, o amostrador coleta oito incrementos por ciclo de amostragem para composição da amostra final. Analisando a média de extração dos três testes realizados para cada grupo separadamente, percebe-se que a partir do quarto incremento, a extração de grossos cai abruptamente, levando a extração para 0% (Figura 62). Apesar da grande variabilidade entre os cortes, a média de extração fica bem próxima da referência do lote, não caracterizando viés.

Tabela 17 - Análise estatística da extração no amostrador secundário

Dados	Tamanho de Partículas (mm)				
	2,5	6,3	10	13,3	15
Teste 01	100,0%	97,1%	86,7%	99,7%	195,0%
Teste 02	112,4%	76,8%	89,6%	100,3%	215,8%
Teste 03	110,1%	96,5%	101,5%	119,4%	0,0%
Objetivo	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Desvio (nível confiança 95%)	16,0%	29,0%	20,0%	28,0%	296,0%
Limite inferior	123,9%	118,8%	112,1%	134,2%	432,7%
Média	107,5%	90,1%	92,6%	106,5%	136,9%
Limite superior	91,1%	61,4%	73,1%	78,7%	-158,8%
Desvio padrão	6,6%	11,6%	7,9%	11,2%	119,0%
Variância	0,4%	1,3%	0,6%	1,3%	141,7%

Fonte – Acervo do autor.

Figura 62 – Extração do amostrador secundário por incremento coletado

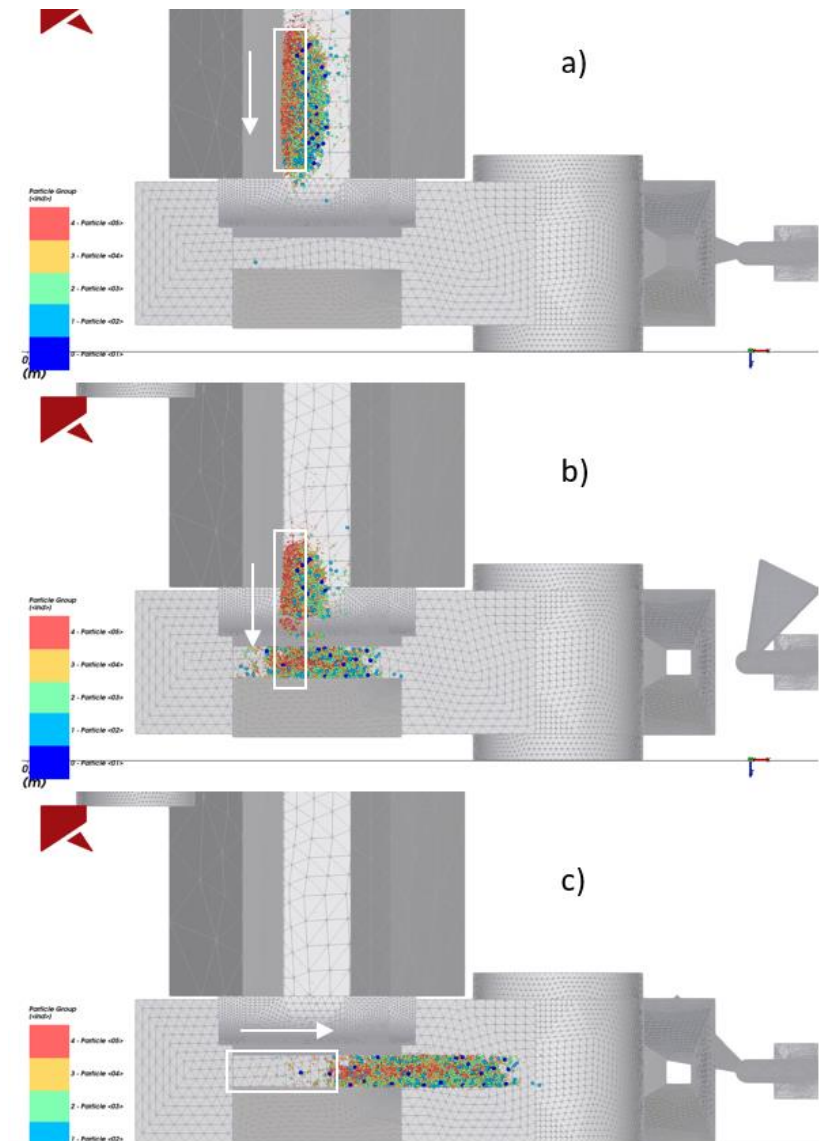


Fonte – Acervo do autor.

A baixa extração de grossos nos últimos cortes é devida à segregação do lote durante a transferência entre as correias e o transporte que leva a amostra primária

até o amostrador secundário. Os finos segregam e se concentram nas extremidades da pilha, o que faz com que somente o material fino seja amostrado nos últimos incrementos coletados (Figura 63).

Figura 63 - Segregação de finos na correia. a) amostra primária; b) amostra primária em transferência; c) amostra primária alimentando o amostrador secundário. Partículas finas (2,5 mm) estão representadas em vermelho e a seta indica sentido do fluxo



Fonte – Acervo do autor.

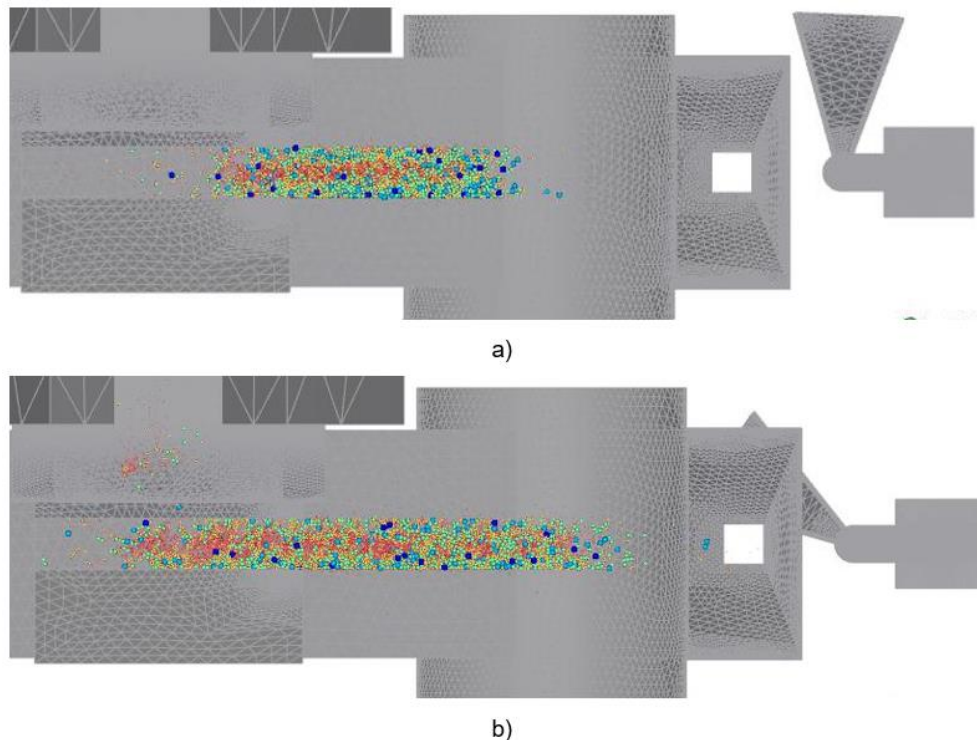
Com base na teoria da amostragem de Pierre Gy, pode-se reduzir a variabilidade observada aumentando o número de incrementos. O número de incrementos depende do tamanho do corte e, de acordo com a teoria da amostragem, podem-se usar ferramentas geoestatísticas para definição do intervalo ideal de corte. Com a estratificação maior do material pela correia, pode-se aumentar o número de

incrementos gerados e, com isso, reduzir o efeito da segregação de finos, melhorando o desempenho do equipamento e mitigando o GSE. Devido à possibilidade de simulação direta do corte e avaliação da variabilidade, foram adotadas modificações diretas no sistema para redução da variabilidade. Algumas modificações foram realizadas e estão sumarizadas a seguir.

- Redução em 25% da velocidade do amostrador primário (45 cm/s para 34 cm/s);
- Redução em 50% da velocidade da correia de recebimento da descarga do amostrador primário (3 cm/s para 1,5 cm/s);
- Redução da vazão do alimentador para, no máximo, 60 t/h.

O objetivo das mudanças foi aumentar a massa do corte primário e aumentar a estratificação do minério na alimentação do amostrador secundário, proporcionando a coleta de um maior número de incrementos. A Figura 64 ilustra a configuração padrão e após as melhorias realizadas no sistema.

Figura 64 - a) Estratificação da amostra na correia de alimentação antes das modificações; b) estratificação da amostra na correia de alimentação depois das modificações



Fonte – Acervo do autor.

A Tabela 18 mostra o resumo estatístico da extração após as modificações realizadas.

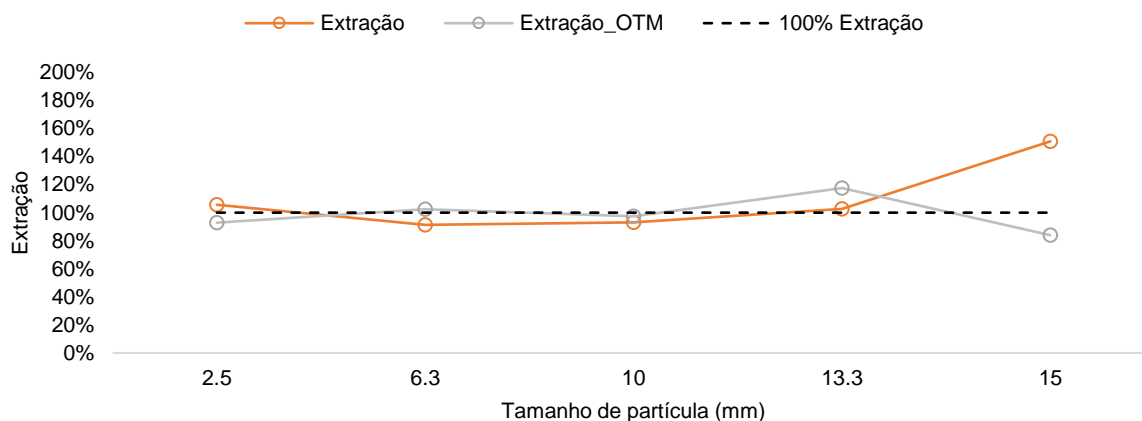
Tabela 18 - Análise estatística da extração no amostrador secundário após melhorias implementadas

Dados	Tamanho de Partículas (mm)				
	2,5	6,3	10	13,3	15
Teste 01	94,7%	94,0%	101,7%	115,4%	110,0%
Teste 02	108,9%	93,9%	90,6%	120,1%	84,3%
Teste 03	98,8%	104,3%	101,7%	87,2%	113,9%
Objetivo	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Desvio (nível confiança 95%)	18,2%	14,8%	15,9%	44,2%	39,9%
Limite inferior	119,0%	112,2%	113,9%	151,7%	142,6%
Média	100,8%	97,4%	98,0%	107,5%	102,7%
Limite superior	82,7%	82,6%	82,1%	63,4%	62,8%
Desvio padrão	7,3%	6,0%	6,4%	17,8%	16,1%
Variância	0,5%	0,4%	0,4%	3,2%	2,6%

Fonte – Acervo do autor.

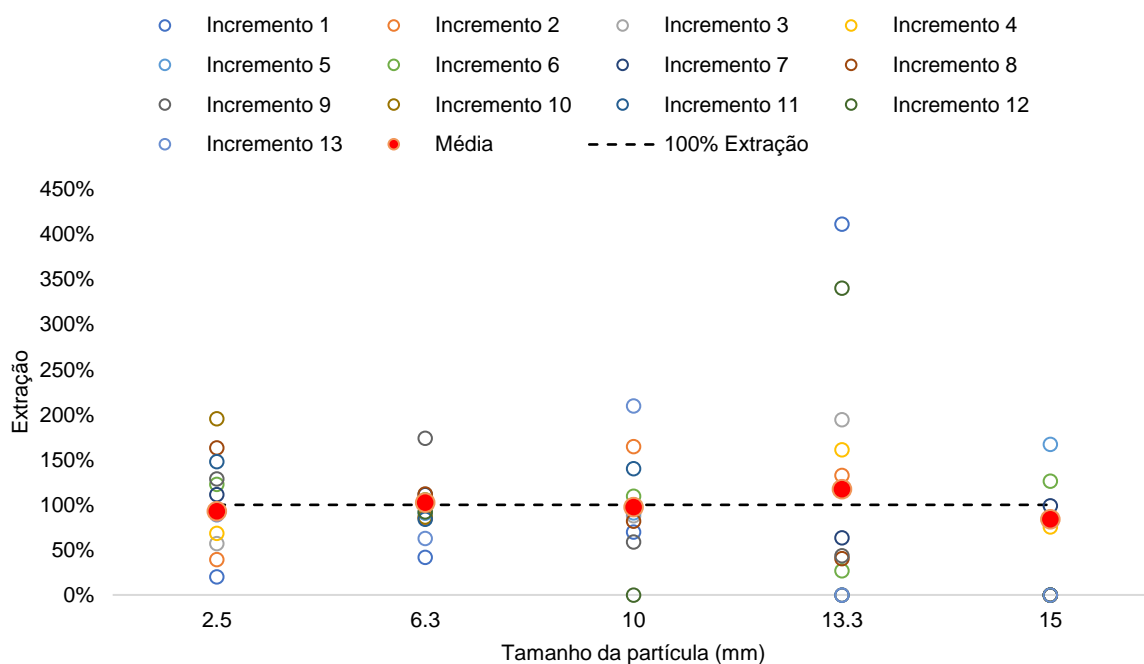
As Figuras 65 e 66 mostram, respectivamente, o comparativo das médias de extração antes e depois das modificações e a extração para cada grupo de partículas por incremento coletado.

Figura 65 – Comparativo entre as extrações no amostrador secundário antes e depois das melhorias no sistema



Fonte – Acervo do autor.

Figura 66 - Extração do amostrador secundário por incremento coletado após melhorias no sistema



Fonte – Acervo do autor.

Após implementação das melhorias, pôde-se reduzir a variância da extração na fração grossa e manter as médias em torno de 100% de extração para todos os grupos de partículas, com desvios mínimos considerando-se a média de extração dos incrementos compostos.

Por fim, vale ressaltar que, além da observância no dimensionamento correto dos equipamentos de amostragem, é essencial que todo o sistema de alimentação dos amostradores seja também corretamente dimensionado, evitando erros sistemáticos que possam resultar em amostras enviesadas.

7 CONCLUSÕES

A metodologia para simulação do amostrador primário linear corta-fluxo e amostrador secundário *Vezein* de CDSII foram aplicadas com sucesso, validando todas as simulações pela qualidade da calibração do modelo de contato entre as partículas no DEM (*software* Rocky 4.3 da ESSS), tendo sido obtidos valores para os parâmetros físicos extremamente próximos aos obtidos nos testes de laboratório. Além disto, a utilidade da ferramenta estatística DOE para calibração dos parâmetros DEM também foi demonstrada.

O procedimento híbrido para calibração dos parâmetros DEM, que leva em consideração os resultados dos testes de laboratório para o modelo de contato entre partículas e mantém valores preestabelecidos para as outras interações do sistema, mostrou-se adequado à aplicação deste estudo. Os resultados obtidos no laboratório foram totalmente replicados em DEM, com boa acurácia em termos de representação do ângulo de repouso e do ângulo de atrito interno do material.

Com base nas simulações e análises realizadas neste estudo, pode-se concluir que, para um minério sulfetado de ouro com alto teor de umidade, o principal problema de amostragem está relacionado à obstrução dos amostradores e, conseqüentemente, o dimensionamento correto dos equipamentos e sistemas de amostragem é de fundamental importância para a mitigação do IEE e a garantia de uma extração correta da amostra. De acordo com a teoria da amostragem e como observado no presente estudo, o IEE pode ser visto como uma das maiores fontes de erro e geração de vieses em amostradores, sendo diretamente influenciado pelas características do material e pelo dimensionamento do amostrador.

Apesar de relativamente baixo, foi identificado um erro sistemático na amostragem primária devido à contaminação da amostra pelo arraste de finos que não deveriam ser coletados. O viés foi de +0,12% relativo no teor global da amostra, representando um impacto estatisticamente irrelevante para o processo de beneficiamento em questão. Entretanto, este resultado corrobora informações históricas importantes da usina, como a concentração maior do ouro nas frações finas,

mostrando a importância de se garantir uma amostragem representativa de cada grupo de tamanho de partículas.

Foi observado, também, que o número de incrementos retirados pelo amostrador secundário *Vezi*n tem influência direta na variância do percentual de extração entre grupos de partículas para cada um dos incrementos coletados. Devido ao efeito de segregação no próprio sistema de amostragem, o aumento do número de incrementos é favorável à redução da variabilidade granulométrica entre incrementos.

Em linhas gerais, não foram observados vieses significativos no sistema de amostragem, podendo comprovar seu correto dimensionamento e sua correta aplicação para o minério em questão. Ressalta-se que o dimensionamento de amostradores e sistemas de amostragem deve levar em consideração as propriedades físicas e químicas do minério e, conseqüentemente, sistemas personalizados devem ser desenvolvidos para cada aplicação.

O presente estudo ressaltou a importância e a influência (i) do grupo de partículas grossas e (ii) do ângulo de atrito interno do material com relação, respectivamente, (i) a problemas de obstrução dos amostradores e (ii) ao dimensionamento adequado do ângulo da calha do amostrador e do ângulo das facas do amostrador. Os parâmetros ideais para dimensionamento de amostradores resultantes deste estudo são sumarizados a seguir:

- Abertura das facas do amostrador (A): 4 vezes o diâmetro da maior partícula (*top size* ou d_{95});
- Ângulo da calha do amostrador (α): $\geq 50^\circ$;
- Ângulo das facas do amostrador (γ): $\geq 50^\circ$;
- Velocidade do amostrador ($V_{m\acute{a}x}$): ≤ 45 cm/s;
- Vazão de sólidos pelo amostrador (Q): todas as simulações apresentaram resultados aceitáveis para a extração.

É importante salientar que este estudo foi realizado para um minério de ouro específico de uma determinada região do Brasil e, assim sendo, os resultados aqui

apresentados não devem ser replicados para outros tipos de minério de ouro com características físico-química diferentes. As recomendações para o dimensionamento de amostradores segundo a teoria da amostragem de Pierre Gy são, na prática, um guia de referência, e devem ser utilizadas com cautela. Cada projeto de amostrador ou sistema de amostragem deve se basear nas recomendações da teoria da amostragem e também, sempre que possível, nos resultados de testes físicos de manuseio.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se uma avaliação detalhada sobre o impacto da utilização de partículas não esféricas na simulação DEM para o sistema de amostragem e avaliação dos parâmetros da teoria da amostragem para dimensionamento de amostradores para diferentes tipos de minério.

Por fim, vale ressaltar que, dentre todos os erros que compõem o erro global de estimativa (OEE), este estudo contemplou apenas o erro de extração do incremento (IEE). No entanto, para o dimensionamento correto de amostradores e de sistemas de amostragem, é essencial que se garanta a ausência dos demais erros sistemáticos (IDE, IWE e IPE) e a minimização dos erros aleatórios (FSE, GSE, QFE e HFE) visando à seleção de amostras precisas, acuradas e, conseqüentemente, representativas.

REFERÊNCIAS

- AJMAL, M. *et al.* Calibration of cohesive DEM parameters under rapid flow conditions and low consolidation stresses. **Powder Technology**, v. 374, p. 22–32, 2020.
- ALLAN, T.; KHAN, A. A. Critical evaluation of powder sample procedures. **The Chemical Engineer**, p. 108–112, 1979.
- ANDRÉ, F. P. **Validation and application of breakage model in the discrete element method through the simulation of comminution systems**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- ANTONY, J. **Design of experiments for engineers and scientists**. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2014. 220 p.
- ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- BARRIOS, G. K. P. *et al.* Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling. **Powder Technology**, v. 248, p. 84–93, 2013.
- BENVENUTI, L.; KLOSS, C.; PIRKER, S. Identification of DEM simulation parameters by Artificial Neural Networks and bulk experiments. **Powder Technology**, v. 291, p. 456–465, 2016.
- BOX, G. E. P.; WILSON, K. B. On the experimental attainment of optimum conditions. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, v. 13, p. 145, 1951.
- CARRIGY, M. A. Experiments on the Angles of Repose of Granular Materials. **Sedimentology**, v. 14, p. 147–158, 1970.
- CHIEREGATI, A. C. *et al.* The point selection error introduced by sampling one-dimensional lots. *In*: THIRD WORLD CONFERENCE ON SAMPLING AND BLENDING, 2007, Porto Alegre. **Proceedings** [...]. Porto Alegre: UFRGS/Fundação Luiz Englert, 2007. p. 405-414.
- CHIEREGATI, A. C. *et al.* Proactive reconciliation as a tool for integrating mining and milling operations. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 29, n. 2, p. 239–244, 2019.
- CHIEREGATI, A. C.; PITARD, F. F. Amostragem. *In*: DA LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**. 6 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. cap. 2, p. 27–65.
- CLEARY, P. W. *et al.* Understanding factors leading to bias for falling-stream cutters using discrete element modelling with non-spherical particles. **Chemical Engineering Science**, v. 63, n. 23, p. 5681–5695, 2008.

CLEARY, P. W.; ROBINSON, G. K. Evaluation of cross-stream sample cutters using three-dimensional discrete element modelling. **Chemical Engineering Science**, v. 63, n. 11, p. 2980–2993, 2008.

CLEARY, P. W.; ROBINSON, G. K. Analysis of Vezin sampler performance. **Chemical Engineering Science**, v. 66, n. 11, p. 2385–2397, 2011a.

CLEARY, P. W.; ROBINSON, G. K. Sampling of cohesive bulk materials by falling stream cutters. **Chemical Engineering Science**, v. 66, n. 17, p. 3991–4003, 2011b.

CLEARY, P. W.; ROBINSON, G. K.; SINNOTT, M. D. Use of granular flow modelling to investigate possible bias of sample cutters. *In*: SECOND WORLD CONFERENCE ON SAMPLING AND BLENDING, 2005, Twin Waters. **Proceedings** [...]. Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2005, p. 69–81.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Geotechnique**, v. 29, p. 47–65, 1979.

DALLINGER, N.; HUBLER, J. Simulation of bottle conveyors—Opportunities of the Discrete Element Method (DEM). *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM PLASTIC-SLIDE-CHAINS AND TRIBOLOGY IN CONVEYOR SYSTEMS, 2017, Chemnitz. **Proceedings** [...]. Chemnitz: Institute of Materials Handling, Conveying and Plastics Engineering, 2017, p. 78–86.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of quality technology**, v. 12, p. 214–219, 1980.

DO, H. Q.; ARAGÓN, A. M.; SCHOTT, D. L. A calibration framework for discrete element model parameters using genetic algorithms. **Advanced Powder Technology**, v. 29, n. 6, p. 1393–1403, 2018.

EL KASSEM, B. *et al.* A semi-automated dem parameter calibration technique of powders based on different bulk responses extracted from auger dosing experiments. **KONA Powder and Particle Journal**, v. 38, p. 235–250, 2021.

FRANÇOIS-BONGARÇON, D. Theory of sampling and geostatistics : an intimate link. **Chemometrics and intelligent Laboratory Systems**, v. 74, n. 1, p. 143–148, 2004

FRANÇOIS-BONGARÇON, D.; GY, P. Critical aspects of sampling in mills and plants : a guide to understanding sampling audits. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 102, n. 8, p. 481–484, 2002.

GRIGORIEFF, A. **Desenvolvimento de um novo protocolo de amostragem de carvão mineral**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GRIGORIEFF, A.; COSTA, J. F.; KOPPE, J. Variogram of a continuous flow - A tool for designing sampling increments. *In*: SECOND WORLD CONFERENCE ON

SAMPLING AND BLENDING, 2005, Twin Waters. **Proceedings** [...]. Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2005, p. 27–31.

GRIMA, A. P.; WYPYCH, P. W. Discrete element simulations of granular pile formation: Method for calibrating discrete element models. **Engineering Computation**, v. 28, n. 3, p. 314–339, 2011.

GY, P. M. **L'Echantillonnage des minerais en vrac**. 2nd ed. Saint-Etienne: Editions du BRGM, 1971. 470 p.

GY, P. M. **Sampling of heterogeneous and dynamic material systems: theories of heterogeneity, sampling and homogenizing**. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 1992. 652 p.

HARRINGTON, E. C. The desirability function. **Industrial Quality Control**, v. 21, p. 494–498, 1965.

HERTZ, H. On the Contact of Elastic Solids. **Journal fur die Reine und Angewandte Mathematik**, v. 92, p. 156–171, 1881.

HORN, E. **The Calibration of Material Properties for Use in Discrete Element Models**. 2012. Thesis (Master of Science in Engineering) - University of Stellenbosch, Stellenbosch, 2012.

ILIC, D. **Bulk solid interactions in belt conveying systems**. 2013. Thesis (Doctor of Philosophy) – The University of Newcastle, Callaghan, 2013.

ILIC, D. Development of design criteria for reducing wear in iron ore transfer chutes. **Wear**, v. 434-435, 2019.

ILIC, D. *et al.* Modelling bulk solid flow interactions in transfer chutes: Shearing flow. **Powder Technology**, v. 354, p. 30–44, 2019.

ILIC, D.; LAVRINEC, A.; OROZOVIC, O. Simulation and analysis of blending in a conveyor transfer system. **Minerals Engineering**, v. 157, p. 106575, 2020.

ILIC, D.; ROBERTS, A.; WHEELER, C. Modelling bulk solid interactions in transfer chutes: Accelerated flow. **Chemical Engineering Science**, v. 209, p. 115197, 2019.

JOHNSTONE, M. W. **Calibration of DEM models for granular materials using bulk physical tests**. 2010. Thesis (Doctor of Philosophy) – The University of Edinburgh, Edinburgh, 2010.

KATTERFELD, A. *et al.* Conveying and construction machinery. *In*: GROTE, K.; HEFAZI, H. **Springer handbook of mechanical engineering**. 2nd ed. Switzerland: Springer Cham, 2021. p. 829-991.

KETTERHAGEN, W.; WASSGREN, C. A perspective on calibration and application of DEM models for simulation of industrial bulk powder processes. **Powder Technology**, v. 402, p. 117301, 2022.

KLEIJNEN, J. P. C. **Design and analysis of simulation experiments**. 1st ed. New York: Springer New York, 2008. 220 p.

KOUIDEN, R. **Residual Plots Revelations**. Disponível em: <http://blog.minitab.com/blog/statistics-for-lean-six-sigma/residual-revelations>. Acesso em: 27 jul. 2021.

LOMMEN; S.; MOHAJERI, M. J.; LODEWIJKS; J.; SCHOTT, D. L. DEM particle upscaling for large-scale bulk handling equipment and material interaction. **Powder Technology**, v. 352, p. 273–282, 2019.

MARSDEN, J. O.; HOUSE, C. L. **The chemistry of gold extraction**. 2nd ed. Colorado: SME, 2006. 651 p.

MINDLIN, R. Compliance of elastic bodies in contact. **Journal of Applied Mechanics**, v. 16, p. 259-268, 1949.

MINDLIN, R.; DERESIEWICZ, H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces. **Journal of Applied Mechanics**, v. 20, p. 237–344, 1953.

MOHAJERI, M. J.; VAN RHEE, C.; SCHOTT, D. L. Replicating cohesive and stress-history-dependent behavior of bulk solids: Feasibility and definiteness in DEM calibration procedure. **Advanced Powder Technology**, v. 32, n. 5, p. 1532–1548, 2021.

MOHAJERI, M. J.; HELMONS, R. L. J.; VAN RHEE, C.; SCHOTT, D. L. A hybrid particle-geometric scaling approach for elasto-plastic adhesive DEM contact models. **Powder Technology**, v. 369, p. 72–87, 2020.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. 3th ed. New York: Wiley, 2009. 680 p.

PATINGE, S.; PRASAD, K. Screw feeder performance prediction using Discrete Element Method (DEM). **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 8, n. 3, p. 48-51, 2017.

PITARD, F. F. **Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control**. 2nd ed. Boca Raton: CRC press, 1993. 516 p.

PITARD, F. F. Effects of residual variances on the estimation of the variance of the Fundamental Error. **Chemometrics and intelligent Laboratory Systems**, v. 74, n. 1, p. 149–164, 2004.

PITARD, F. F. **Pierre Gy's theory of sampling and C.O. Ingamells' poisson process approach**. 2009. Thesis (Doctor of Philosophy) - Aalborg University, Esbjerg, 2009.

PITARD, F. F. Minimization of sampling bias (elimination of incorrect sampling errors). *In: Horizontal Standard Notes*, Broomfield, 2010. (Personal notes).

PITARD, F. F. **Theory of sampling and sampling practices**. 3th ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. 694 p.

RACKL, M.; HANLEY, K. J. A methodical calibration procedure for discrete element models. **Powder Technology**, v. 307, p. 73–83, 2017.

ROBERTS, A. W. **Basic principles of bulk solids, storage, flow and handling**. Callaghan: Institute for Bulk Materials Handling Research, 1998.

ROBINSON, G. K.; SINNOTT, M. D. Discrete element modelling of square cross-belt samplers with baffles. *In: FIFTH WORLD CONFERENCE ON SAMPLING AND BLENDING*, 2011, Santiago. **Proceedings** [...]. Santiago: Gecamin, 2011.

ROCKY DEM. **DEM Technical Manual 4.3**, 2020.

ROESSLER, T. *et al.* Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials – part I: Solving the problem of ambiguous parameter combinations. **Powder Technology**, v. 343, p. 803–812, 2019.

ROESSLER, T.; KATTERFELD, A. Scaling of the angle of repose test and its influence on the calibration of DEM parameters using upscaled particles. **Powder Technology**, v. 330, p. 58–66, 2018.

ROESSLER, T.; KATTERFELD, A. DEM parameter calibration of cohesive bulk materials using a simple angle of repose test. **Particuology**, v. 45, p. 105–115, 2019.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MTC, 2007. 570 p.

SANTOS-MUNGUÍA, P. C. *et al.* Hidden gold in fire assay of gold telluride ores. **Minerals Engineering**, v. 141, p. 105844, 2019.

SHEN, J.; ROBERTS, A.; WHEELER, A. Dem simulations on gate loads and bin storage characteristics before discharge. **Powder Technology**, v. 383, p. 280–291, 2021.

SILVA, B. B. *et al.* Modeling and simulation of green iron ore pellet classification in a single deck roller screen using the discrete element method. **Powder Technology**, v. 332, p. 359–370, 2018.

TAGUCHI, G. **System of experimental design**. 1st ed. Dearborn: UNIPUB/Kraus International Publications, 1987. 1189 p.

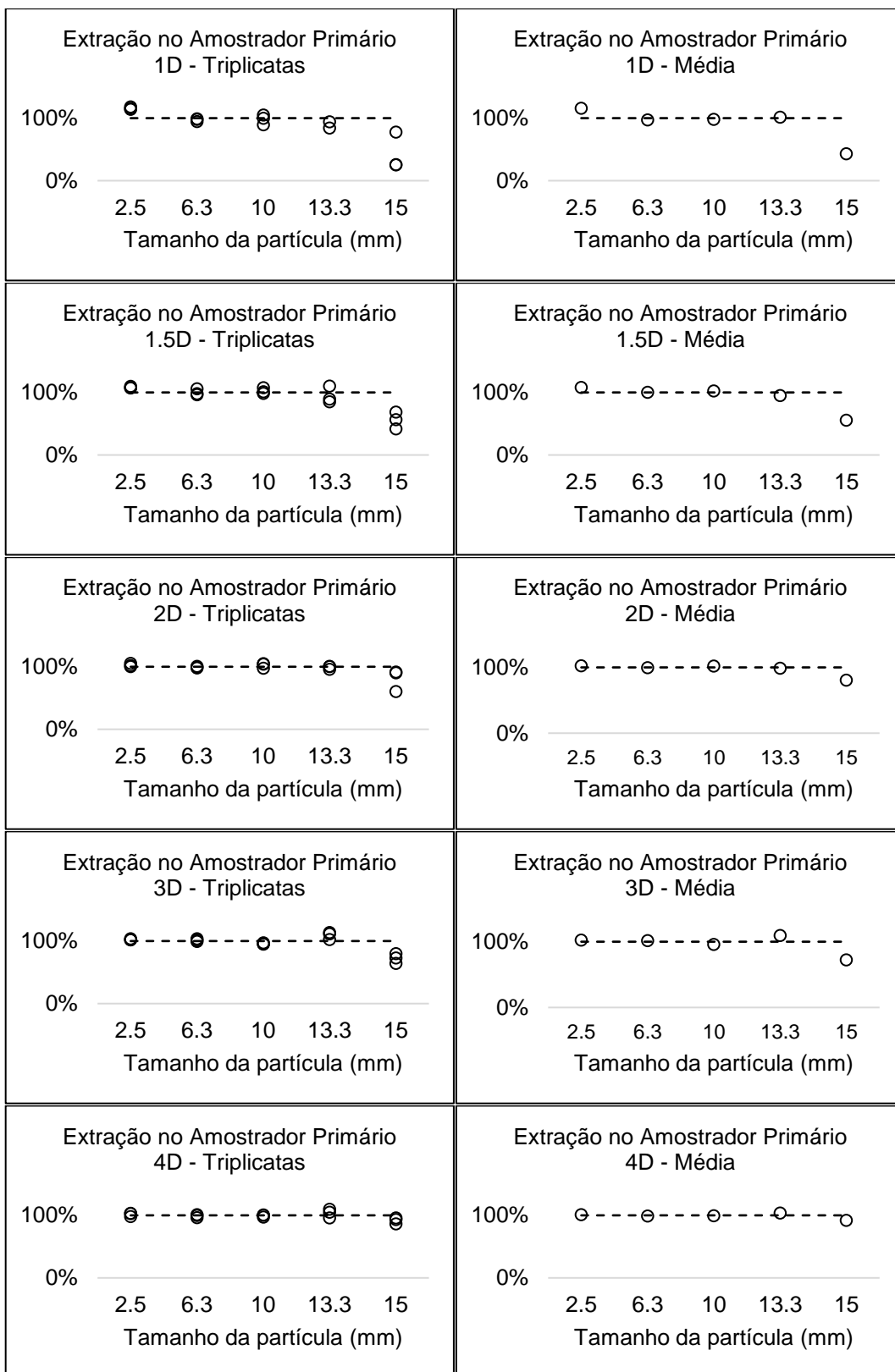
WALTON, O. R.; BRAUN, R. L. Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks. **Journal of Rheology**, v. 30, n. 5, p. 949–980, 1986.

WENSRICH, C. M.; KATTERFELD, A. Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM. **Powder Technology**, v. 217, p. 209–417, 2012.

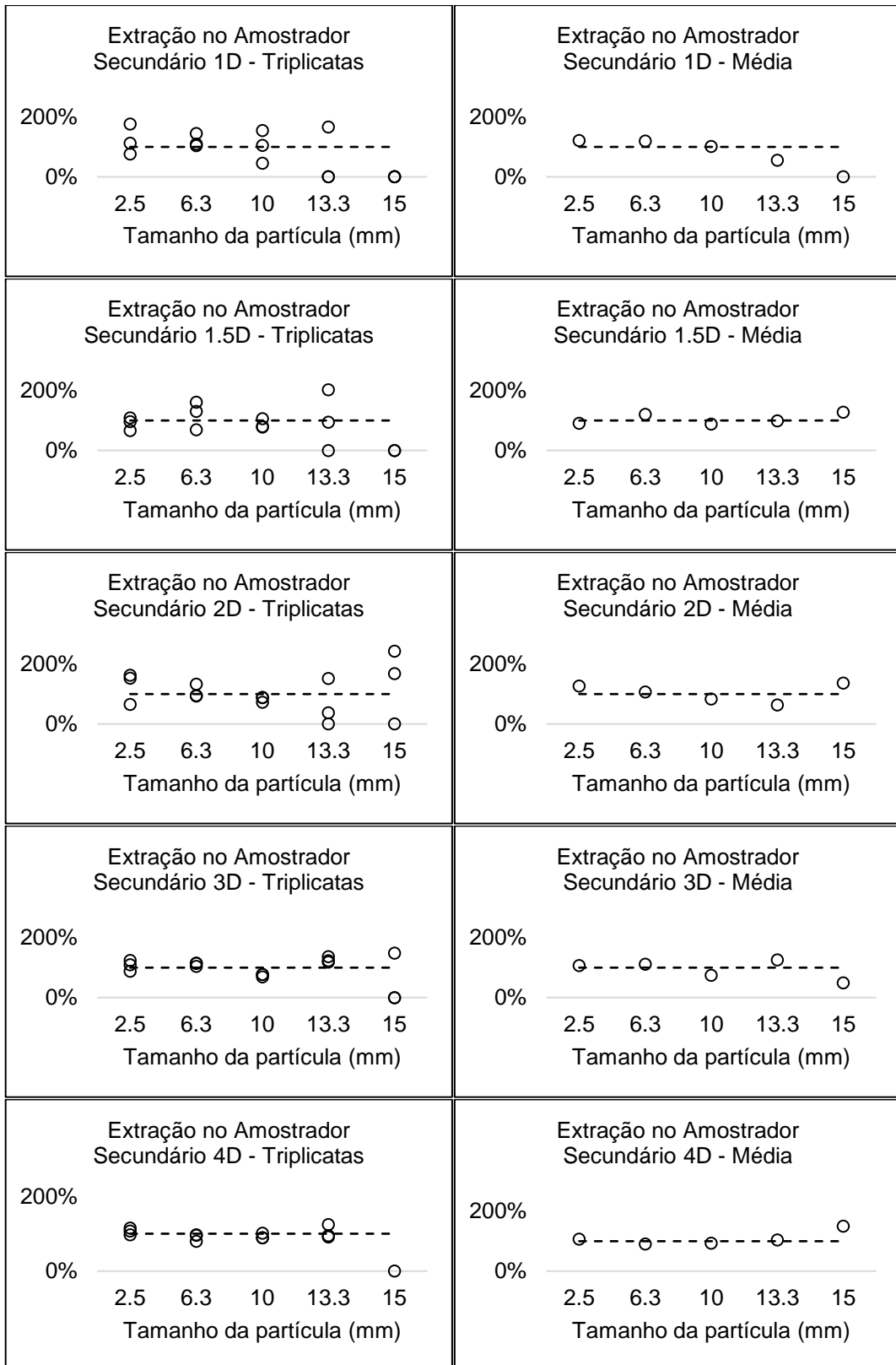
WU, C. F. J.; HAMADA, M. **Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization**. 1st ed. New York: Wiley, 2000. 664 p.

APÊNDICE A – Taxa de extração para abertura das facas do amostrador

Amostrador Primário

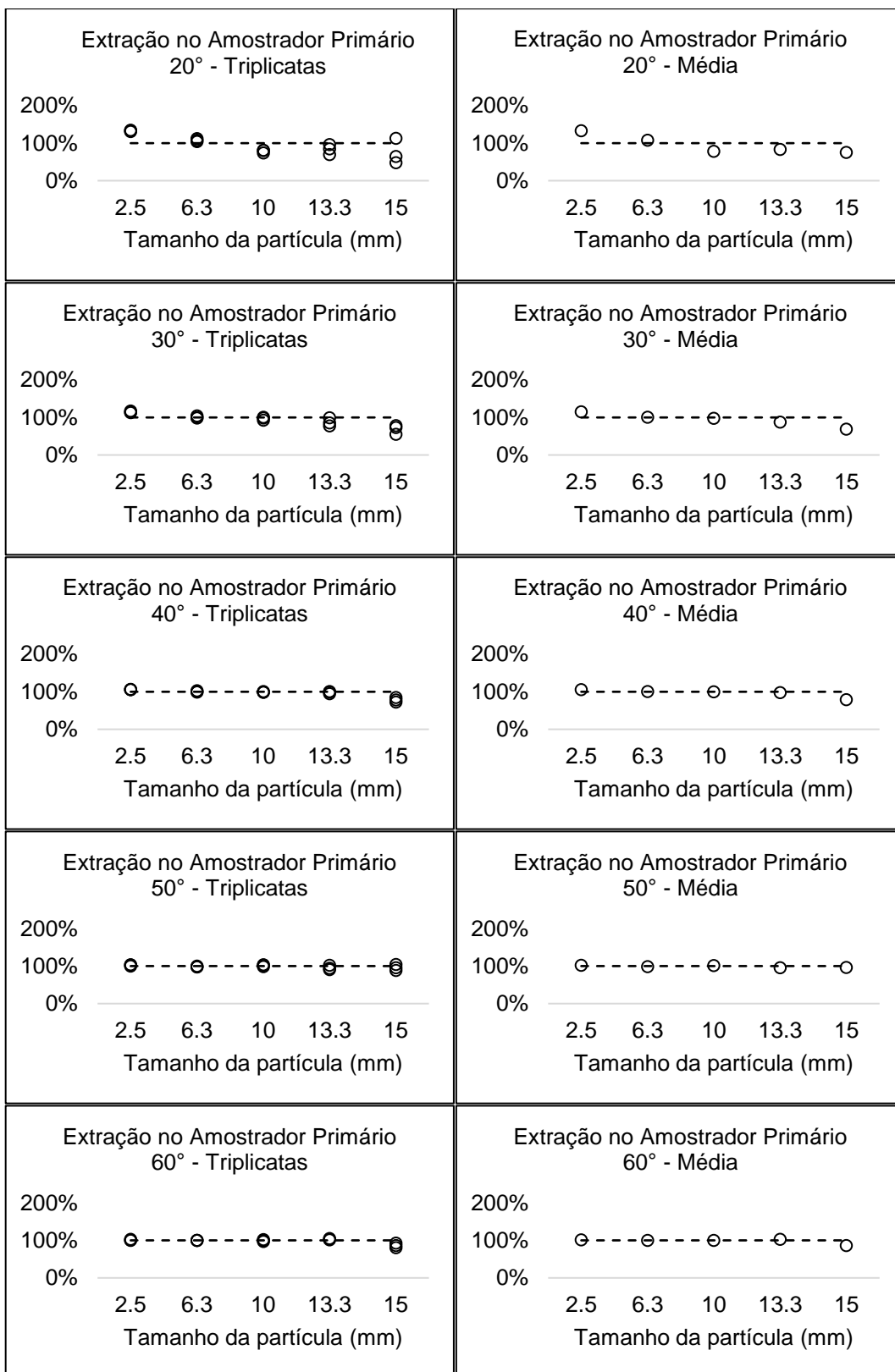


Amostrador Secundário



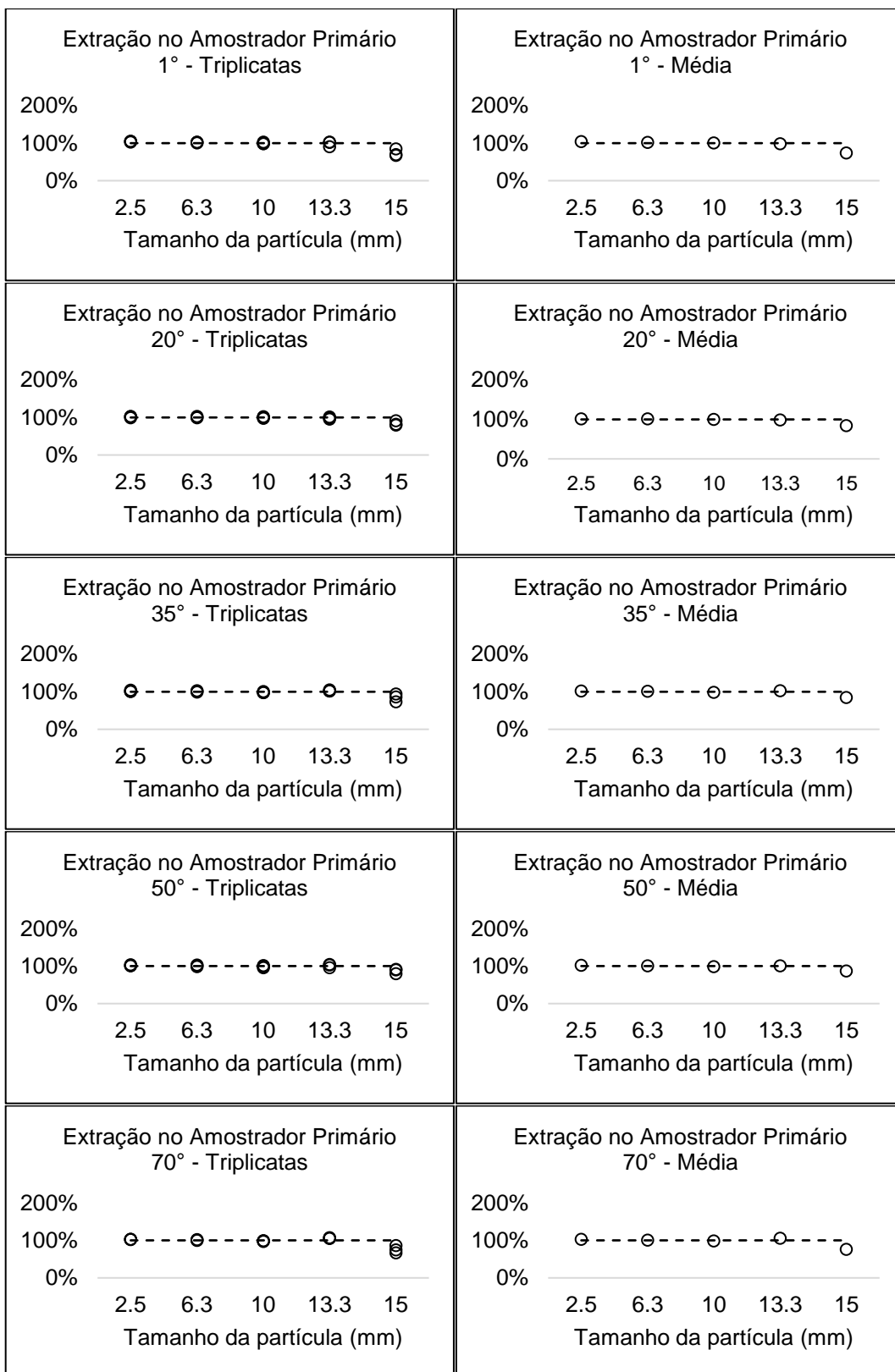
APÊNDICE B – Taxa de extração para ângulo da calha do amostrador

Amostrador Primário

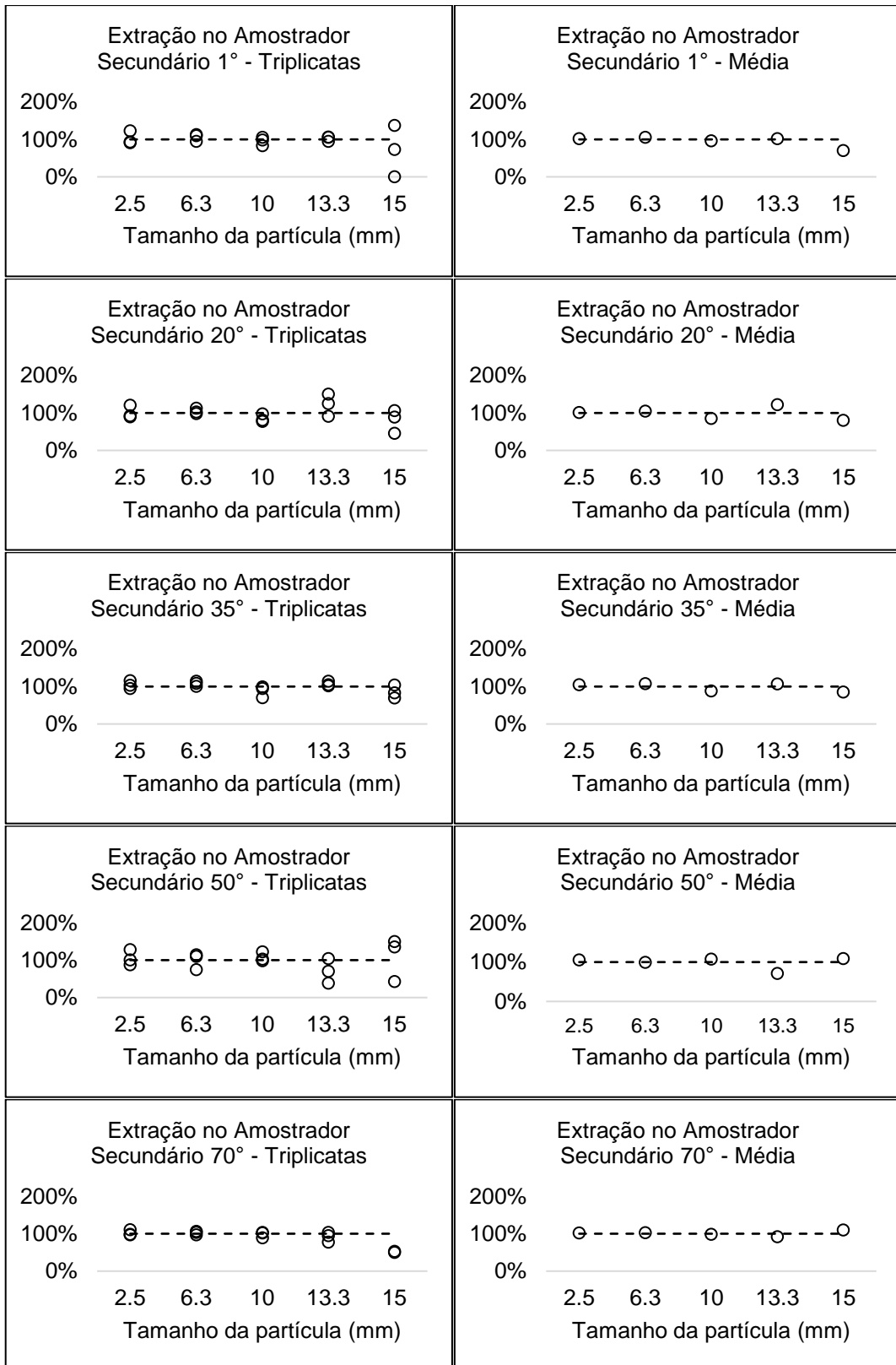


APÊNDICE C – Taxa de extração para ângulo da faca do amostrador

Amostrador Primário

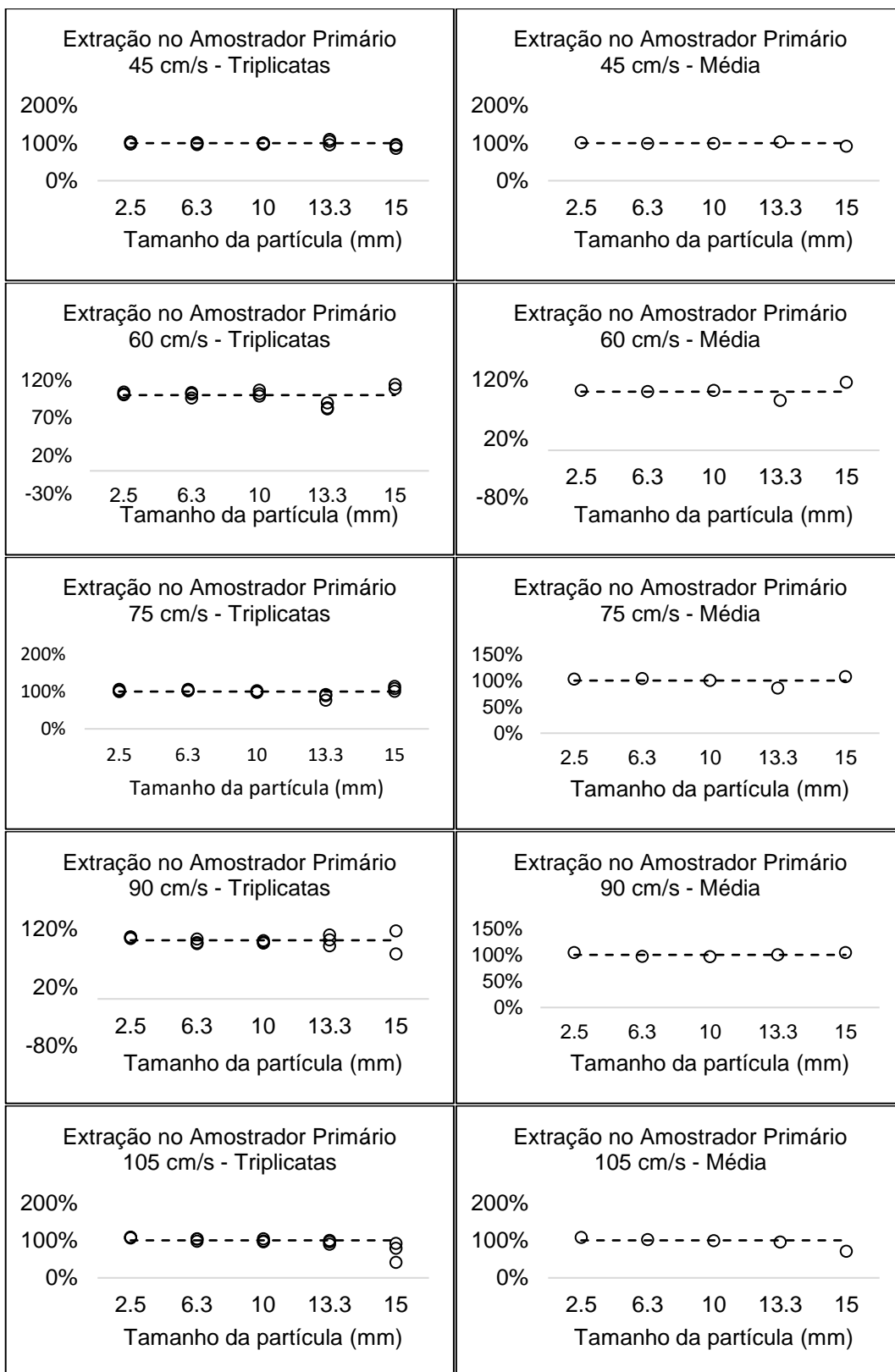


Amostrador Secundário

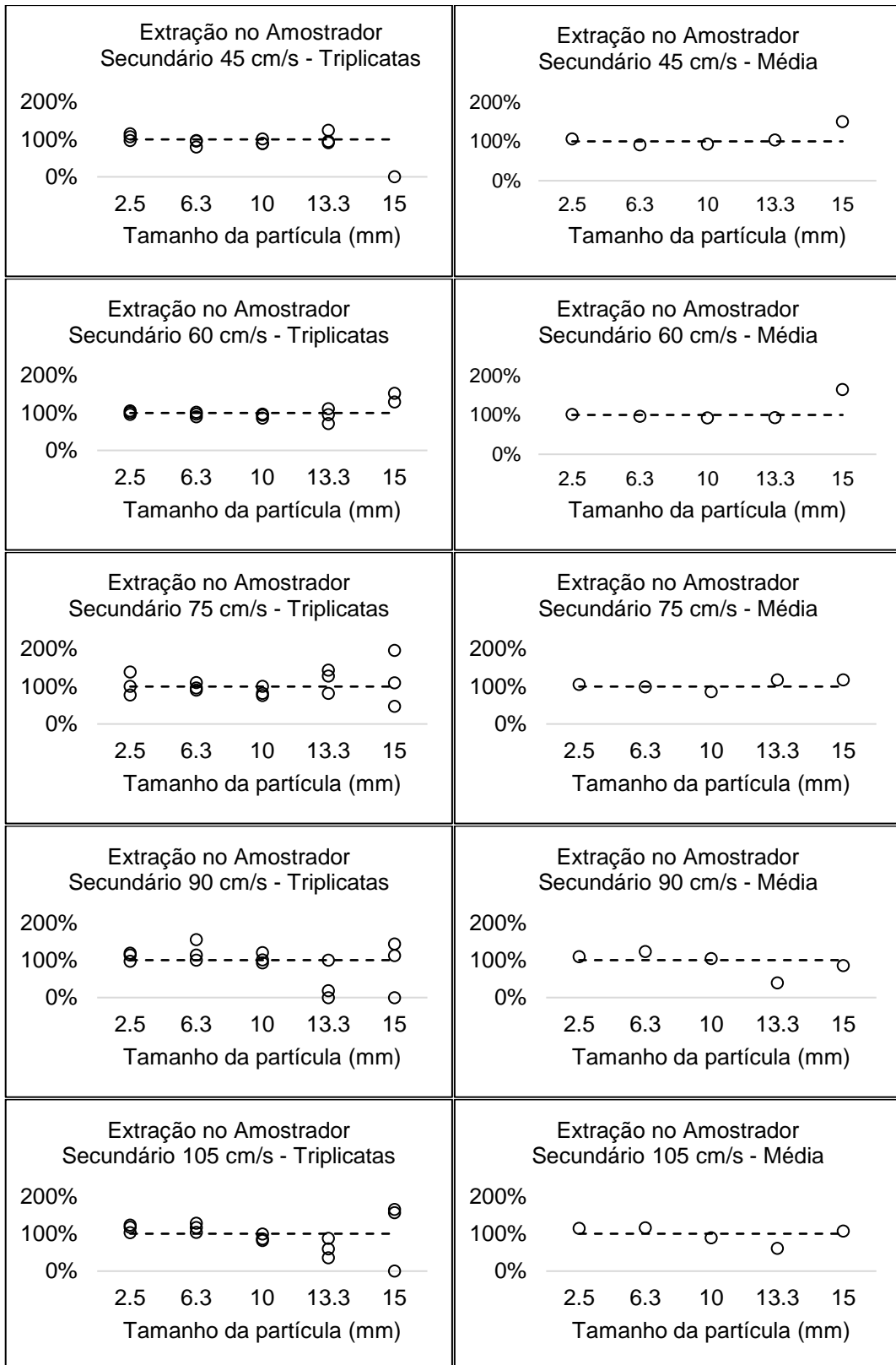


APÊNDICE D – Taxa de extração para velocidade do amostrador

Amostrador Primário

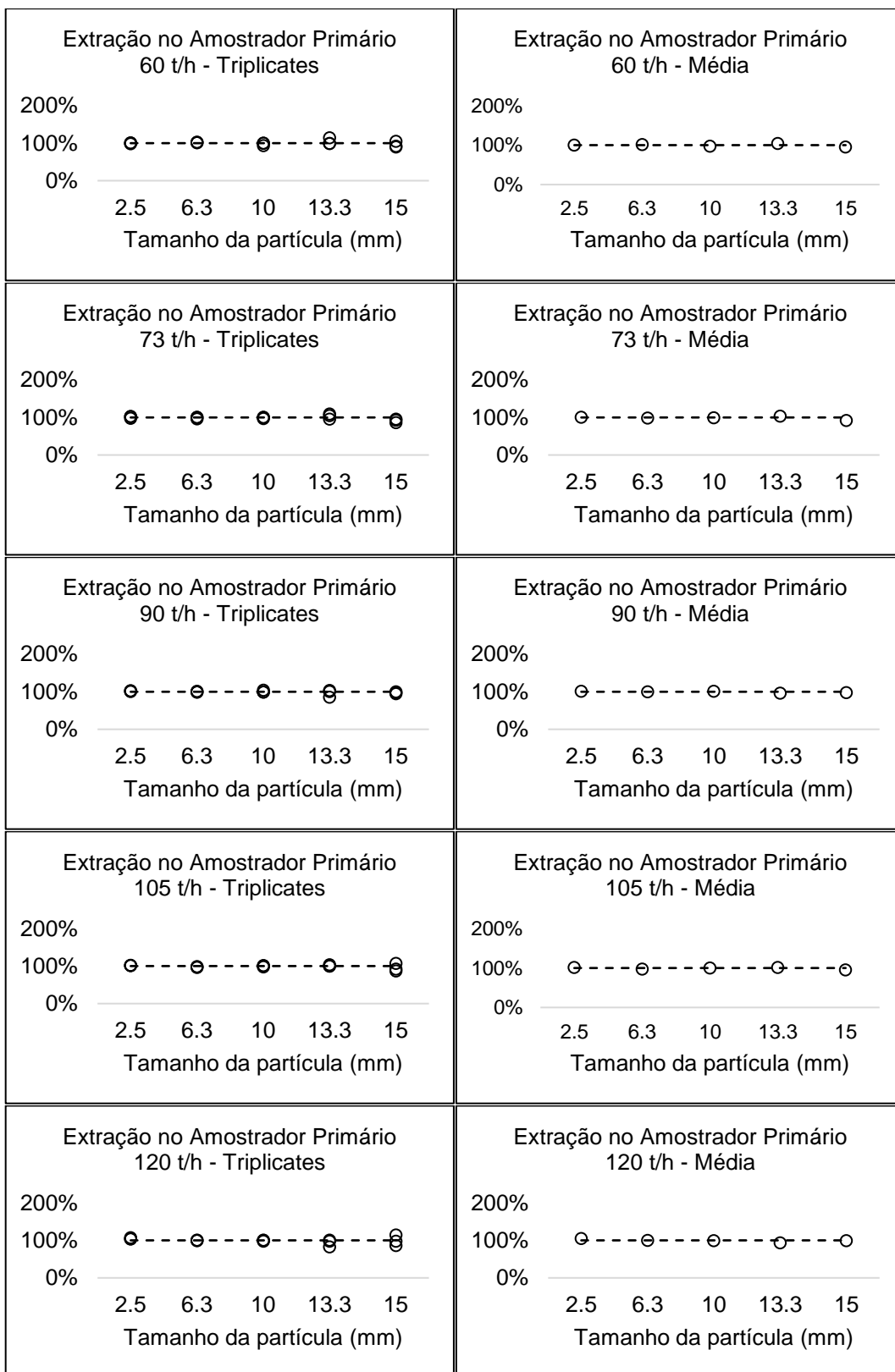


Amostrador Secundário



APÊNDICE E – Taxa de extração para vazão de alimentação de sólidos

Amostrador Primário



Amostrador Secundário

