



**INSTITUTO  
TECNOLÓGICO  
VALE**

**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e  
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)  
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

**Dissertação**

**SOLUÇÃO DE PROBLEMAS NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO VIA  
MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: O CASO DE UM SEPARADOR  
MAGNÉTICO VERTICAL, DE UM ALIMENTADOR DE SAPATAS E DE UMA  
PENEIRA VIBRATÓRIA**

**Leonardo Carvalho Oliveira de Souza**

**Ouro Preto  
Minas Gerais, Brasil  
2021**

**Leonardo Carvalho Oliveira de Souza**

**SOLUÇÃO DE PROBLEMAS NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO VIA  
MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: O CASO DE UM SEPARADOR  
MAGNÉTICO VERTICAL, DE UM ALIMENTADOR DE SAPATAS E DE UMA  
PENEIRA VIBRATÓRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Thiago Antonio Melo Euzébio,  
D.Sc.

Coorientador: Eleir Mundim Bortoleto, D.Sc.

Ouro Preto  
2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729s Souza, Leonardo Carvalho Oliveira De .

Solução de problemas na indústria da mineração via modelagem e simulação computacional [manuscrito]: o caso de um separador magnético vertical, de um alimentador de sapatas e de uma peneira vibratória. / Leonardo Carvalho Oliveira De Souza. - 2021.

104 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Melo Euzebio.

Coorientador: Prof. Dr. Eleir Mundim Bortoleto.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Minérios - Processamento - Concentração à seco. 2. Método dos Elementos Discretos (DEM). 3. Minérios - Umidade no peneiramento. I. Bortoleto, Eleir Mundim. II. Euzebio, Thiago Antonio Melo. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5:622.2



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
PROGR. POS GRAD. PROF. INST. CONT. E AUT.  
PROCESSOS DE MIN.



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Leonardo Carvalho Oliveira de Souza**

**Solução de Problemas na Indústria da Mineração Via Modelagem e Simulação Computacional: O Caso de um Separador Magnético Vertical, de um Alimentador de Sapatas e de uma Peneira Vibratória**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Aprovada em 09 de setembro de 2021

**Membros da banca**

Doutor - Thiago Antonio Melo Euzébio - Orientador - Instituto Tecnológico Vale

Doutor - Eleir Mundim Bortoleto - Instituto Tecnológico Vale

Doutor - Neymayer Pereira Lima - Vale

Doutor - Philip von Pritzelwitz - Instituto Tecnológico Vale

Doutor - José Aurélio Medeiros da Luz - Universidade Federal de Ouro Preto

Doutora - Manuela Souza Leite - Universidade Tiradentes

Thiago Antonio Melo Euzébio, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 03/12/2021.



**PÓS-GRAD EM INSTRUMENTAÇÃO CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO**, em 06/12/2021, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0254113** e o código CRC **5ED96B94**.

---

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.012767/2021-10

SEI nº 0254113

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: - www.ufop.br

# Agradecimentos

Agradeço à Deus; à minha família, em especial à Renata; aos meus orientadores, Thiago Euzébio e Eleir. Ao Instituto Tecnológico Vale e aos amigos feitos durante esta jornada. Aos professores, à Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), do Instituto Tecnológico Vale (ITV) e da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

## **Resumo**

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

# SOLUÇÃO DE PROBLEMAS NA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO VIA MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: O CASO DE UM SEPARADOR MAGNÉTICO VERTICAL, DE UM ALIMENTADOR DE SAPATAS E DE UMA PENEIRA VIBRATÓRIA

Leonardo Carvalho Oliveira de Souza

Setembro/2021

Orientadores: Thiago Antonio Melo Euzébio  
Eleir Mundim Bortoleto

A utilização de modelagem e simulação computacional é uma estratégia que garante às indústrias ganho temporal e financeiro pois permite prever o comportamento de uma máquina ou operação. Especificamente na área de mineração, este trabalho aplica a modelagem e simulação nos estudos de caso de um separador magnético vertical, um alimentador de sapatas e uma peneira vibratória. No primeiro caso visa-se a redução do consumo de água pela substituição do processo de lavagem do concentrado, e para tanto, simulações computacionais do escoamento de fluido (via modelo em CFD) e da magnetização (via modelo em Eletromagnetismo) além de testes laboratoriais, mostram uma alternativa ao usar a desmagnetização do minério e substituição da água por ar comprimido. O segundo caso contempla um alimentador de sapatas que apresenta grande variabilidade na entrega de material e então é proposta a instalação de uma comporta deslizante; para análise do funcionamento da comporta, simulações via DEM são realizadas. O último caso analisa, também via DEM, o funcionamento de uma peneira vibratória quando o material admitido está seco (umidade natural) ou quando apresenta valores maiores de umidade representada pela força de coesão entre partícula-partícula e adesão entre partícula-estrutura. Para o separador magnético vertical, os resultados mostraram que o sistema proposto é capaz de reduzir e até mesmo eliminar a água de lavagem do concentrado. No caso do alimentador de sapatas, a instalação de uma comporta deslizante permitiu aumentar em um grau de liberdade no controle da vazão em massa de minério e por fim, o caso da peneira vibratória, identificou-se que o coeficiente de coesão, parâmetro de ajuste do modelo, pode representar a umidade do minério.

**Palavras-chave:** Concentração à Seco, DEM, Comporta Deslizante, Redução de Variabilidade, Umidade no Peneiramento.

**Macrotema:** Usina; **Linha de Pesquisa:** Instrumentação no Processamento de Minérios; **Tema:** Redução de Umidade na Cadeia, Redução de Variabilidade e Melhoria de Controle; **Área Relacionada da Vale:** Brucutu e Carajás.

## **Abstract**

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

# TROUBLESHOOTING IN THE MINING INDUSTRY VIA COMPUTER MODELING AND SIMULATION: THE CASE OF A VERTICAL MAGNETIC SEPARATOR, AN APRON FEEDER AND A VIBRATING SCREEN

Leonardo Carvalho Oliveira de Souza

September/2021

Advisors: Thiago Antonio Melo Euzébio  
Eleir Mundim Bortoleto

The use of computational modeling and simulation is a strategy that guarantees the industry's temporal and financial gain as it allows predicting the behavior of a machine or operation. Specifically, in the mining area, this work applies computational modeling and simulation in the case studies of a vertical magnetic separator, an apron feeder, and a vibrating screen. In the first case, the aim is to reduce water consumption by replacing the concentrate washing process, and for that, computational simulations of fluid flow (via the CFD model) and magnetization (via the Electromagnetism model) in addition to laboratory tests, show an alternative to using ore demagnetization and replacing water with compressed air. The second case contemplates an apron feeder that presents high variability in the delivery of material, and then the installation of a sliding gate is proposed; to analyze the proper functioning of the gate, simulations using the discrete element method (DEM) are performed. The last case analyzes, also by DEM simulation, the operation of a vibrating screen when the admitted material is dry (natural moisture) or when it presents higher moisture values represented by the cohesion force between particle-particle and adhesion force between particle-structure. For the vertical magnetic separator, the results showed that the proposed system is able to reduce and even eliminate washing water from the concentrate. In the case of the apron feeder, the installation of a sliding gate allowed a degree of freedom to be increased in the control of the mass flow of ore and, finally, in the case of the vibrating screen, it was identified that the cohesion coefficient, an adjustment parameter of the model, can represent the moisture of the ore.

**Keywords:** Dry Concentration, DEM, Sliding Gate, Variability Reduction, Moisture on Screening.

**Macrotheme:** Plant; **Research Line:** Instrumentation in Mineral Processing; **Theme:** Reduction of Humidity in the Chain, Reduction of Variability and Control Improvement; **Related Area of Vale:** Brucutu e Carajás.

# Lista de Figuras

Figura 2.1	Esquema representativo do processo de separação magnética. . . . .	20
Figura 2.2	Laço de histerese. . . . .	22
Figura 2.3	Momento magnético para materiais. . . . .	23
Figura 2.4	Curvas de magnetização para os tipos de magnetismo em materiais. . . . .	23
Figura 2.5	Polia magnética para separação de materiais fortemente magnéticos. . . . .	26
Figura 2.6	Separador magnético a úmido de baixa intensidade por tambor. . . . .	26
Figura 2.7	Separador Magnético de alta intensidade e alto gradiente (WHIMS). . . . .	28
Figura 2.8	Separador magnético vertical pulsante de alto gradiente (VPHGMS). . . . .	29
Figura 2.9	Distribuição do campo magnético ao redor dos pinos de uma matriz. . . . .	30
Figura 2.10	Componentes em detalhes de um VPHGMS. . . . .	31
Figura 2.11	Matriz magnética. . . . .	32
Figura 2.12	Fluxograma de funcionamento de um VPHGMS. . . . .	33
Figura 2.13	Modelo para magnetização do pino da matriz. . . . .	33
Figura 2.14	Modelo para escoamento de fluido na matriz magnética. . . . .	34
Figura 2.15	Modelo para escoamento de ar comprimido. . . . .	34
Figura 2.16	Malha gerada para a simulação da bobina/pino. . . . .	35
Figura 2.17	Malha para escoamento em uma matriz magnética. . . . .	35
Figura 2.18	Magnetização do conjunto minério e pino. . . . .	38
Figura 2.19	Detalhe pino da matriz e minério de ferro. . . . .	39
Figura 2.20	Desmagnetização do conjunto minério e pino. . . . .	39
Figura 2.21	Dispositivos a serem acoplados em um VPGHMS modelo. . . . .	40
Figura 2.22	Limpeza por ar comprimido em processo de usinagem. . . . .	40
Figura 2.23	Modelo computacional: magnetização de um pino da matriz. Regime permanente. . . . .	41
Figura 2.24	Pino com minério após a magnetização. . . . .	44
Figura 2.25	Pino com minério após a desmagnetização. . . . .	44
Figura 2.26	Escoamento da água na matriz magnética: velocidade relativa. Regime permanente após vencida a condição transiente. . . . .	45
Figura 2.27	Escoamento do ar na matriz magnética: velocidade relativa. Regime permanente após vencida a condição transiente. . . . .	45

Figura 2.28	Escoamento da água na matriz magnética: pressão estática. Regime permanente após vencida a condição transiente. . . . .	46
Figura 2.29	Escoamento do ar na matriz magnética: pressão estática. Regime permanente após vencida a condição transiente. . . . .	46
Figura 2.30	Injetor de ar comprimido proposto. . . . .	47
Figura 2.31	Escoamento do ar utilizando o injetor proposto. Regime permanente após vencida a condição transiente. . . . .	47
Figura 2.32	Escoamento do ar utilizando o injetor proposto, vista inferior. Regime permanente após vencida a condição transiente. . . . .	48
Figura 3.1	Transportador de parafuso: Sem inclinação (à esquerda) e 10° de inclinação (à direita). . . . .	51
Figura 3.2	(a) Resultado da tensão na correia transportadora tubular (FEM). (b) Resultado da força normal de contato entre as partículas (DEM). Fonte: Zheng <i>et al.</i> (2017a) . . . . .	51
Figura 3.3	Modelagem e simulação de um britador cônico e suas partículas. . . . .	52
Figura 3.4	(a) Comparação entre dois modos de vibração de uma peneira vibratória via DEM. . . . .	53
Figura 3.5	Correia transportadora com grande variabilidade no fluxo de material. . . . .	54
Figura 3.6	Alimentador de sapatas. . . . .	55
Figura 3.7	Localização do Projeto Serra Leste. . . . .	57
Figura 3.8	Alimentação primária da mina de Serra Leste. . . . .	57
Figura 3.9	Esquema da britagem primária da usina de Serra Leste. . . . .	58
Figura 3.10	Modelo computacional: sistema silo alimentador de sapatas, unidades em metros. . . . .	59
Figura 3.11	Malha do modelo computacional do sistema silo alimentador de sapatas. . . . .	59
Figura 3.12	Aproximação de Rosin-Rammler para distribuição granulométrica. . . . .	63
Figura 3.13	Sistema silo alimentador de sapatas - Cenário 1 ao fim da simulação. . . . .	64
Figura 3.14	Sistema silo alimentador de sapatas - Cenário 2 ao fim da simulação. . . . .	64
Figura 3.15	Sistema silo alimentador de sapatas - Cenário 3 ao fim da simulação. . . . .	65
Figura 3.16	Altura do leito de minério para os três cenários. . . . .	65
Figura 3.17	Dados brutos da vazão em massa para os três cenários. . . . .	66
Figura 3.18	Boxplot da vazão em massa. . . . .	66
Figura 3.19	Médias móveis da vazão em massa para os três cenários. . . . .	67
Figura 3.20	Histograma e curva de distribuição normal para os três cenários. . . . .	68
Figura 3.21	Histograma e curva de distribuição normal para os cenários 1 e 3. . . . .	68
Figura 3.22	Esquema de uma peneira vibratória. . . . .	70
Figura 3.23	Comportamento coletivo das partículas em uma peneira. . . . .	71
Figura 3.24	Efeito da umidade sobre o peneiramento. . . . .	71

Figura 3.25	Peneira vibratória modular excêntrica. . . . .	73
Figura 3.26	Partícula de minério e aproximação para a simulação. . . . .	73
Figura 3.27	Distribuição granulométrica real genérica e distribuição granulométrica usada como parâmetro de entrada da simulação. . . . .	74
Figura 3.28	Peneira vibratória - cenários após 30 s. . . . .	77
Figura 3.29	Vista detalhada da peneira e partículas. . . . .	78
Figura 3.30	Número de partículas ao longo da peneira - Cenário 1. . . . .	79
Figura 3.31	Número de partículas ao longo da peneira - Cenário 2. . . . .	79
Figura 3.32	Número de partículas ao longo da peneira - Cenário 3. . . . .	80
Figura 3.33	Número de partículas ao longo da peneira - Cenário 4. . . . .	80
Figura 3.34	Distribuição granulométrica no cenário 1. . . . .	81
Figura 3.35	Distribuição granulométrica no cenário 2. . . . .	82
Figura 3.36	Distribuição granulométrica no cenário 3. . . . .	82
Figura 3.37	Distribuição granulométrica no cenário 4. . . . .	83
Figura 38	Comprovante de depósito da patente . . . . .	90
Figura 39	Certificado de Apresentação no CBA . . . . .	91
Figura 40	Convite para submissão no Journal of Control, Automation and Electrical Systems . . . . .	92

# Lista de Siglas e Abreviaturas

**CBA (2020)** XXIII Congresso Brasileiro de Automática

**CFD** *Computational Fluid Dynamic* (Dinâmica de Fluidos Computacional)

**FEM** *Finite Element Method* (Método dos elementos finitos)

**INPI** Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**JCAE** Journal of Control Automation and Electrical Systems

**ROM** *Run-of-Mine* (Minério bruto)

**VPHGMS** *Vertical Pulsating High-Gradient Magnetic Separator* (Separador Magnético de Alto Gradiente Pulsante Vertical)

**WHGMS** *Wet High Gradient Magnetic Separator* (Separador Magnético de Alto Gradiente a Úmido)

**WHIMS** *Wet High Intensity Magnetic Separator* (Separador Magnético de Alta Intensidade a Úmido)

# Lista de Símbolos

$N_n$  amortecimento normal

$N_t$  amortecimento tangencial

$A_{ij}$  área de contato entre partículas  $i$  e  $j$

$E_A$  módulo de Young da esfera A

$E_B$  módulo de Young da esfera B

$N_{ndamp}$  coeficiente de amortecimento normal

$C_{fs}$  coeficiente de atrito estático

$k$  coeficiente de coesão

$C_{nrest}$  coeficiente de restituição normal

$C_{trest}$  coeficiente de restituição tangencial

$U_{mp}$  energia magnética de uma partícula

$U_{mf}$  energia magnética de um volume fluido

$E_{eq}$  módulo de Young equivalente

$F_{n,coesao}$  força de coesão

$F_{contact}$  força de contato entre partículas e estrutura

$F_n$  força normal

$F_t$  força tangencial

$G_{eq}$  módulo de cisalhamento equivalente

$B$  indução magnética

$H$  intensidade de campo magnético

$K_n$  rigidez normal

$M_A$  massa da esfera A

$M$  magnetização

$M_B$  massa da esfera B

$M_{eq}$  massa equivalente

$d_n$  sobreposição na direção normal

$d_t$  sobreposição na direção tangencial

$\mu_f$  permeabilidade magnética de um fluido

$\mu$  permeabilidade magnética

$\mu_p$  permeabilidade magnética de uma partícula

$\mu_r$  permeabilidade magnética relativa

$\mu_0$  permeabilidade magnética no vácuo

$V_A$  coeficiente de Poisson da esfera A

$V_B$  coeficiente de Poisson da esfera B

$R_A$  raio da esfera A

$R_B$  raio da esfera B

$R_{eq}$  raio equivalente

$\chi$  suscetibilidade magnética

$\chi_f$  suscetibilidade magnética de um fluido

$\chi_p$  suscetibilidade magnética de uma partícula

$V_n$  velocidade normal

$V_f$  volume de fluido

$V_p$  volume de partícula sólida

$V_t$  velocidade tangencial

# Sumário

<b>1 APRESENTAÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2 PARTE A: MECANISMO PARA SEPARAÇÃO A SECO EM CONCENTRADOR MAGNÉTICO VERTICAL</b>	<b>15</b>
2.1 <b>Introdução</b>	15
2.1.1 Contextualização	15
2.1.2 Motivação	16
2.1.3 Hipóteses	17
2.1.4 Objetivos	17
2.2 <b>Referencial Teórico</b>	18
2.2.1 Minério de ferro e beneficiamento mineral	18
2.2.2 Magnetismo e separação magnética	19
2.2.3 Simulação computacional	30
2.3 <b>Materiais e Métodos</b>	31
2.3.1 Caracterização do equipamento de estudo	31
2.3.2 Metodologia	32
2.4 <b>Resultados</b>	41
2.4.1 Magnetização e desmagnetização do pino da matriz e minério de ferro	41
2.4.2 Escoamento dos fluidos na matriz magnética	42
2.5 <b>Conclusão</b>	48
<b>3 PARTE B: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL VIA MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (DEM): O CASO DE UM ALIMENTADOR DE SAPATAS E O CASO DE UMA PENEIRA VIBRATÓRIA</b>	<b>50</b>
3.1 <b>Introdução</b>	50
3.2 <b>Modelos numéricos via DEM</b>	50
3.3 <b>O caso de um alimentador de sapatas</b>	53
3.3.1 Hipóteses	56
3.3.2 Objetivos	56
3.3.3 Área de estudo	56
3.3.4 Metodologia	58

3.3.5	Resultados e discussões . . . . .	63
3.3.6	Conclusões . . . . .	67
3.4	<b>O caso de uma peneira vibratória</b> . . . . .	69
3.4.1	Hipótese . . . . .	72
3.4.2	Objetivos . . . . .	72
3.4.3	Metodologia . . . . .	72
3.4.4	Resultados e discussões . . . . .	75
3.4.5	Conclusões . . . . .	81
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>84</b>
	<b>Anexos</b>	<b>89</b>

# 1. APRESENTAÇÃO

Este documento consiste em uma coletânea de três trabalhos baseados em modelagem e simulação computacional de equipamentos de mineração. O primeiro trabalho proporcionou o depósito de uma patente e é apresentado na primeira parte desta dissertação; trata-se de um mecanismo pra separação a seco em concentrador magnético vertical, o qual, quando aplicado em escala industrial apresenta um grande potencial de redução do consumo de água no processo de concentração mineral. Já o segundo e terceiro trabalhos, apresentados na segunda parte da dissertação, consiste na modelagem e simulação via método de elementos discretos para (i) avaliação da instalação de uma comporta deslizante em um sistema silo-alimentador de sapatas para melhorar o controle da vazão de minério na saída do equipamento e (ii) análise do funcionamento de uma peneira vibratória diante a variação de umidade de minério de ferro. O trabalho que abrange o alimentador de sapatas foi apresentado no XXIII Congresso Brasileiro de Automática e selecionado para submissão em uma versão especial do Journal of Control, Automation and Electrical Systems - JCAE.

## **2. PARTE A: MECANISMO PARA SEPARAÇÃO A SECO EM CONCENTRADOR MAGNÉTICO VERTICAL**

### **2.1. Introdução**

Neste capítulo são apresentadas a motivação e justificativa deste trabalho, além das hipóteses levantadas e os objetivos.

#### **2.1.1. Contextualização**

Um dos maiores desafios da indústria mineral é manter-se competitiva e de forma conjunta minimizar os danos provocados ao meio ambiente. De acordo com Brasil (2019), a indústria mineral brasileira registrou no ano de 2018 uma produção de minério de ferro beneficiado de 450 Mt (milhões de toneladas) com teor médio de ferro de 63,86%. Este dado coloca o Brasil entre os três maiores produtores mundiais e demonstra a importância do país neste cenário. Ressalte-se que grande parte das operações de mineração, especialmente aquelas de beneficiamento, são extremamente dependentes de recursos hídricos; mesmo que os índices de recirculação e reuso da água ultrapassem 90% nas empresas, os valores absolutos de água nova são significativos (DOMINGUES *et al.*, 2006). Para Freitas e Magrini (2013), a forte dependência de água nas operações de mineração é uma questão importante para a sustentabilidade, tanto ambiental quanto social e econômica de uma empresa, pois resulta em restrições para licenciamento de novas operações e diminuição da aceitação pública.

Dentre os processos de beneficiamento mineral, destaca-se para este projeto a separação magnética. A separação magnética baseia-se na diferença de comportamento das partículas minerais devido as suas propriedades físico-químicas quando inseridas em um campo magnético. Assim, as partículas com maior capacidade de serem magnetizadas podem ser atraídas para uma superfície de um objeto também magnetizada, enquanto as partículas que apresentam menor capacidade de serem magnetizadas não são atraídas. Separadores magnéticos industriais contam com a água para lavagem do material, ou seja, as partículas magnetizadas que se encontram presas às superfícies magnetizadas precisam ser removidas de alguma forma, e o método mais comum é a utilização de jatos de água.

O processo de lavagem para obtenção do concentrado gera um consumo elevado de água além da necessidade de secagem posterior do minério. De acordo com Outotec (2013), os separadores magnéticos industriais mais modernos, do tipo vertical, podem necessitar de 5 a 1200  $m^3/h$  de água para lavagem do concentrado, sendo esta variação relacionada com a capacidade do equipamento (a relação pode chegar a uma tonelada de polpa alimentada para 2,5 toneladas de água para lavagem), tais valores são, ainda, referentes a utilização de um spray para lavagem otimizada focada na redução do consumo de água.

Levando em consideração a Vale, maior produtora mundial de minério de ferro, pelo-

tas e níquel (VALE, 2020), a empresa possui maior parte da sua produção localizada na região Norte (estado do Pará) e na região Sudeste (estado de Minas Gerais) do Brasil. Especialmente o minério da região Sudeste, por apresentar teores de ferro menores, precisam de mais beneficiamento mineral para atingir a concentração ideal. No entanto, a empresa esbarra em um problema que é a menor disponibilidade de água na região Sudeste: apenas cerca de 6% da água doce do Brasil encontra-se na região Sudeste enquanto 68% está na região Norte do país (BRASIL, 2009).

Diante ao problema entre beneficiamento mineral eficiente e o interesse em reduzir o consumo de água por parte das mineradoras, estuda-se neste trabalho, os efeitos da aplicação de um desmagnetizador e um limpador mecânico em um concentrador magnético do tipo *Vertical Pulsating High-Gradient Magnetic Separator* (Separador Magnético de Alto Gradiente Pulsante Vertical) ou VPHGMS com o objetivo que esses dispositivos permitam a redução do consumo de água de lavagem ou mesmo sua substituição por ar comprimido.

### 2.1.2. Motivação

É sabido que a empresa Vale conta com vários separadores magnéticos nas usinas de beneficiamento, principalmente na região Sudeste do Brasil, e todos eles usam água no processo de lavagem do concentrado pois ainda não existe uma tecnologia capaz de fazer a lavagem a seco. É sabido também que a empresa tem como missão o desenvolvimento sustentável e como valor cuidar do planeta Terra, e para isso desenvolve projetos que visam a economia de água como na mina de Sossego em Canaã dos Carajás (estado do Pará) onde foram realizadas uma série de ações voltadas para aumentar a recirculação da água, o que fez com que, em 2012, a sua reutilização chegasse a 99%. A economia no consumo equivale a cerca de 900 mil  $m^3/ano$  de água, que antes era bombeada do rio Parauapebas e é suficiente para abastecer uma cidade de 25 mil habitantes por seis meses (VALE, 2020).

Espera-se que o desenvolvimento de mecanismos a serem acoplados no separador magnético propicie além da redução do consumo de água por meio da separação a seco do minério, uma melhor eficiência de separação e redução dos custos de processos de secagem do minério em atividades subsequentes. Apesar da importância prática para o setor mineral, não há na literatura estudos similares tampouco equipamento capaz de realizar a tarefa com baixo consumo de água.

Para visualização da quantidade de água utilizada por um único VPHGMS de grande porte<sup>1</sup>, tem-se que para cada 1 tonelada de material processado necessita-se de 2,5 toneladas de água para enxágue das matrizes e obtenção do concentrado. Destaca-se ainda que a eliminação da água nessa etapa implica na supressão de um espessador e quatro filtros prensas projetados para secar o minério oriundo.

---

<sup>1</sup>Para a análise foi considerado um VPHGMS da empresa Outotec, modelo SLon 4000. Fonte: Outotec (2013)

### **2.1.3. Hipóteses**

Para o desenvolvimento desta pesquisa, duas hipóteses são formuladas:

- A desmagnetização das matrizes de um separador magnético do tipo VPHGMS facilitará a separação do concentrado das matrizes.
- A utilização de ar comprimido para a limpeza das matrizes após a desmagnetização será eficiente e reduzirá o consumo de água do processo.

### **2.1.4. Objetivos**

Como objetivo geral deste trabalho tem-se propor um novo sistema de lavagem para um separador magnético VPHGMS para reduzir a utilização de água no processo de beneficiamento de minério de ferro.

No alcance desse objetivo contemplam-se os seguintes objetivos específicos:

- Construir um modelo computacional de um pino de matriz magnética de VPHGMS para observação do comportamento em magnetização.
- Construir um modelo computacional de limpeza de uma matriz magnética utilizando água e ar comprimido para comparação.
- Construir em laboratório um modelo físico para magnetização e desmagnetização de um pino de uma matriz magnética para a realização de experimentos.

## 2.2. Referencial Teórico

É apresentado neste capítulo um referencial teórico sobre minério de ferro, beneficiamento mineral, separação magnética, propriedades magnéticas dos minerais, equipamentos de separação magnética, simulação computacional além das atualidades relacionadas ao projeto de modo a respaldar a pesquisa, bem como servir de apoio para os procedimentos metodológicos inerentes ao tema proposto.

### 2.2.1. Minério de ferro e beneficiamento mineral

O minério de ferro é encontrado na natureza de modo que pode ser obtido ferro metálico de maneira economicamente viável. Por meio de diversos processos industriais com tecnologia de ponta, o minério é beneficiado para, posteriormente, ser vendido para as indústrias siderúrgicas (VALE, 2020). O ferro encontra-se geralmente sob a forma de óxidos, como a magnetita e a hematita ou ainda como um carbonato, a siderita, tais óxidos são conhecidos como minerais ferríferos (Tabela 2.1). Dentre os minerais ferríferos, destaca-se a hematita pela grande presença nas reservas brasileiras (no Quadrilátero Ferrífero no Estado de Minas Gerais e na serra de Carajás no Estado do Pará) além do seu elevado teor de ferro. No Brasil a hematita ocorre em grandes massas compactas ou friáveis, ou como rocha metamórfica laminada em camadas alternadas com quartzo denominada itabirito (HENRIQUES *et al.*, 2013).

Tabela 2.1: Minerais ferríferos

	Magnetita	Hematita	Siderita	Goethita
Cor	cinza escuro	cinza a vermelho ocre	cinza esverdeado	marrom amarelado a marrom escuro
Composição	$Fe_3O_4$	$Fe_2O_3$	$FeCO_3$	$FeO(OH)$
% Fe	72,36	69,96	48,29	62,90

Fonte: Adaptado de Henriques *et al.* (2013) e Chaves (1996) e Valadão e Araújo (2007) .

De acordo com Chaves (1996) e Valadão e Araújo (2007) raramente as espécies minerais se encontram puras na natureza, mas há exceções conhecidas como a hematita. As demais espécies encontram-se em um estado de pureza relativa ou misturadas e para que haja aproveitamento industrial de algumas delas, é necessário separá-las das demais. As diferentes propriedades físicas das espécies define os diferentes processos de concentração mineral que ocorrem nas usinas de beneficiamento. Dentre os processos de concentração mineral pode-se citar a catação, a separação magnética e a separação em meio denso. Ainda que o objetivo final

das usinas seja a concentração de um mineral, algumas outras operações compõem o circuito de beneficiamento, de modo que cada etapa é, portanto, uma operação unitária. As operações unitárias podem ser agrupadas nos seguintes grupos:

- operações de cominuição, que consistem em quebrar as partículas em tamanho adequado e são auxiliadas por operações de separação de tamanhos, como nas peneiras e classificadores;
- operações de concentração que visam separar as partículas das diferentes espécies minerais;
- operações auxiliares que transportam os diferentes produtos intermediários entre operações e também separam a água.

Ressalta-se, devido a pertinência para este trabalho, o processo de concentração mineral por separação magnética; a separação magnética consiste na utilização de um campo magnético que atrai partículas com suscetibilidade magnética positiva, ou seja, pelo menos um dos componentes deve apresentar propriedades magnéticas, o que promove a separação dos demais componentes. Para melhor entendimento do assunto, alguns conceitos de magnetismo e separação magnética são apresentados nas seções seguintes.

### **2.2.2. Magnetismo e separação magnética**

Registros dos conhecimentos sobre forças magnéticas datam de pelo menos 600 anos a.C. O filósofo grego Thales de Mileto conhecia algumas propriedades do mineral lodestone que é uma variação da magnetita, um ímã natural. Tratando-se de separação magnética de minerais, a primeira patente é datada de 1792 e é creditada ao pesquisador inglês William Fularton que descreveu um processo de concentração de minério de ferro utilizando magnetismo (FURSTENAU & HAN, 2003; PESSOA JÚNIOR, 2010). Fuerstenau e Han (2003) mencionam que as últimas pesquisas na área de ciência dos materiais e tecnologia magnética têm permitido o desenvolvimento de separadores magnéticos de alta intensidade e alto gradiente com forças de campo acima de 6 T (ou 60.000 G), o que torna o processo beneficiamento mineral por separação magnética cada vez mais eficiente.

Assim, a separação magnética é uma separação física de partículas discretas baseadas em força magnética trativa além de forças concorrentes que englobam forças gravitacionais, inerciais, de atrito e também forças de atração e repulsão interpartículas. Essas forças combinadas atuam nas partículas com diferentes propriedades magnéticas promovendo a separação (GAUDIN, 1939b; OBERTEUFFER, 1974; SVOBODA, 2004). Por meio da Figura 2.1 nota-se um esquema representativo de um processo de separação magnética; se o separador produzir um concentrado magnético, o rejeito é um material não magnético, ou seja a partir de uma

alimentação, as forças atuam no material e então é gerado um produto magnético, que representa o concentrado, um produto intermediário (menos magnético e menos concentrado) e por fim, o produto não magnético ou rejeito.

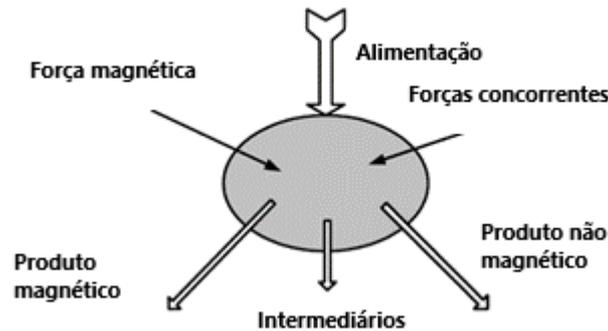


Figura 2.1: Esquema representativo do processo de separação magnética.  
Fonte: Svoboda (2004).

Para melhor entendimento do processo de separação magnética, faz-se necessário o conhecimento de algumas propriedades dos materiais e os equipamentos utilizados atualmente nos processos de separação.

### Principais propriedades magnéticas dos materiais

Uma carga elétrica em movimento configura um campo magnético no espaço ao seu redor, e um campo magnético exerce uma força sobre materiais magnéticos ou cargas elétricas que se movem através deste campo. De modo geral, a expressão campo magnético pode ser utilizado para dois campos vetoriais diferentes representados por intensidade de campo magnético,  $H$ , dado em  $A/m$  e indução magnética,  $B$ , dado em  $G$  ou  $T$ . A indução magnética ( $B$ ) relaciona-se com a intensidade de campo magnético ( $H$ ) por meio da Eq. 2.1, sendo  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no vácuo ( $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ ).

$$B = \mu_0 H \quad (2.1)$$

Um ímã colocado em um campo magnético, está submetido a um momento de uma força ao tentar se alinhar ao campo. Ao dividir o momento magnético por unidade de volume de material, tem-se a magnetização ( $M$ ). A magnetização é a medida da resposta de um material quando aplicado um campo magnético assim como este material modifica o campo magnético. Como na maioria das aplicações há a presença de alguma substância magnética que provoca uma magnetização induzida, tem-se a parcela da magnetização no campo magnético. Portanto, a indução magnética é dada pela soma da intensidade de campo magnético com a magnetização dada pela Eq. 2.2 para materiais ferromagnéticos.

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.2)$$

A suscetibilidade magnética ( $\chi$ ) pode ser definida como a capacidade que um material tem de magnetizar-se sob ação de um estímulo magnético. O cálculo da suscetibilidade é dado pela razão entre magnetização e a densidade de fluxo magnético e é adimensional quando é dada em função do volume, ou tem a unidade  $m^3/kg$  quando dada em função da massa (Eq. 2.3).

$$\chi = M/H \quad (2.3)$$

Já a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) indica um campo magnético no interior de um material e o cálculo é feito, de modo similar à suscetibilidade, pela razão entre a indução magnética e a densidade de fluxo magnético (Eq. 2.4).

$$\mu = B/H \quad (2.4)$$

Ainda é possível trabalhar com a permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) obtida pela razão entre a permeabilidade absoluta e a permeabilidade no vácuo (Eq. 2.5).

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \quad (2.5)$$

Outro conceito importante para entender os processos de separação magnética é a histerese magnética. A presença de magnetismo pode induzir a histerese magnética em corpos, o que ocorre quando um corpo submetido a campo magnético se magnetiza, mas ao retirar esse campo, o material não é desmagnetizado completamente e nem de forma instantânea. A curva característica de histerese é apresentada na Figura 2.2. Nota-se que quando um material é magnetizado este pode chegar a um estágio de saturação. Retirando o campo magnético, a magnetização diminui porém não volta a um valor nulo, necessitando de uma desmagnetização.

### **Tipos de magnetismo em minerais**

Todos os minerais podem ser classificados quanto às suas propriedades magnéticas e são sensíveis à presença de um campo magnético. Os diferentes comportamentos magnéticos são resultantes das estruturas eletrônicas dos elementos e podem ser classificados em cinco grupos (GUPTA & YAN, 2016):

- Puramente diamagnéticos;
- Paramagnéticos;
- Ferromagnéticos;
- Ferrimagnéticos;
- Antiferromagnéticos.

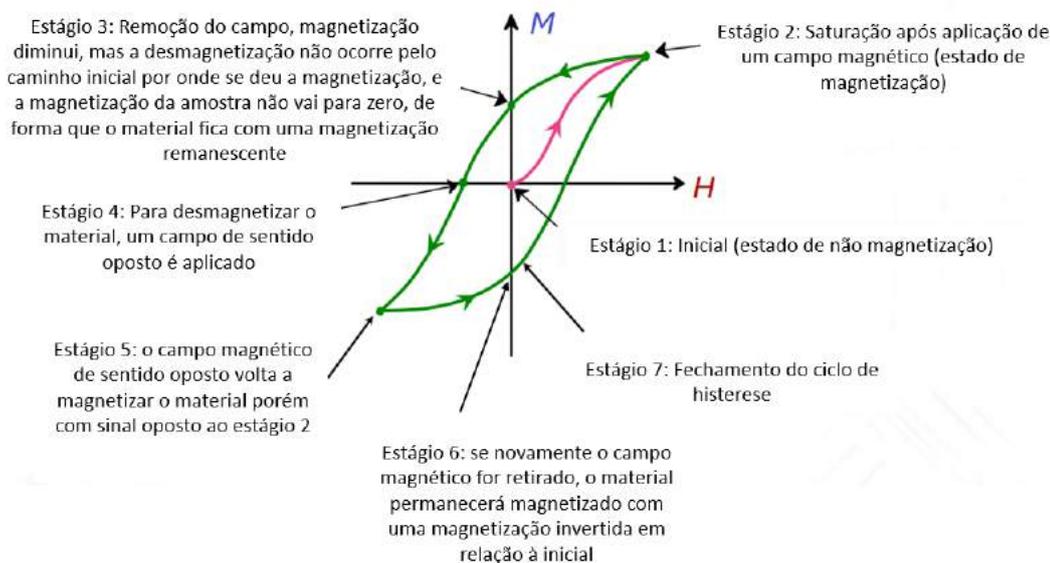


Figura 2.2: Laço de histerese.

Fonte: Adaptado de Callister Junior e Rethwisch (2002).

Cada um destes grupos é apresentado a seguir e seus momentos magnéticos demonstrados na (Figura 2.3).

**Puramente diamagnéticos:** Os minerais diamagnéticos são aqueles que apresentam um campo magnético induzido fraco e oposto ao campo magnético externo. Devido ao baixo valor de suscetibilidade e permeabilidade magnética, o magnetismo destes minerais, na prática, pode ser considerado zero. Como exemplo tem-se o quartzo.

**Paramagnéticos:** Minerais paramagnéticos são aqueles que possuem elétrons desemparelhados. Na presença de um campo magnético estes elétrons se alinham na direção do campo e quando o campo é removido, o magnetismo tende a zero. Normalmente geram forças magnéticas suficientes para a aplicação prática de separadores magnéticos de alta intensidade (MARTÍN-HERNÁNDEZ & FERRÉ, 2007). Dentre os minerais ferríferos tem-se alguns exemplos como a pirita e siderita.

**Ferromagnéticos:** Os minerais ferromagnéticos apresentam fortes propriedades magnéticas em estado natural; neste caso, há uma forte interação interna entre os átomos adjacentes gerando momentos magnéticos atômicos paralelos e alinhados entre si. Mesmo quando há a remoção do campo a magnetização se mantém. Ressalta-se que não há minerais puramente ferromagnéticos na natureza.

**Ferrimagnéticos e Antiferromagnéticos:** Com comportamento parecido aos minerais paramagnéticos, tem-se a minerais ferrimagnéticos e antiferromagnéticos. A diferença é baseada no momento magnético: para os ferrimagnéticos há dipolos opostos com menores forças, já para os antiferromagnéticos há dipolos opostos com forças iguais que se cancelam, neste caso, de modo geral, a magnetização existe, porém é menor quando comparada a ferrimagnética além de ser suscetível à variação de temperatura. Como exemplo de minerais ferríferos antiferromagnéticos tem-se a Hematita e a Goetita. Até a década de 1940 a Magnetita era considerada um mineral ferromagnético e a partir de estudos passou a ser classificada como ferrimagnética (GUPTA & YAN, 2016; MARTÍN-HERNÁNDEZ & FERRÉ, 2007).

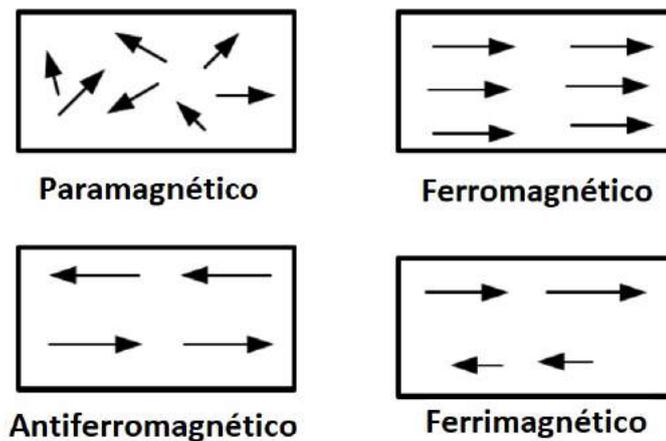


Figura 2.3: Momento magnético para materiais.  
 Fonte: Svoboda (2004).

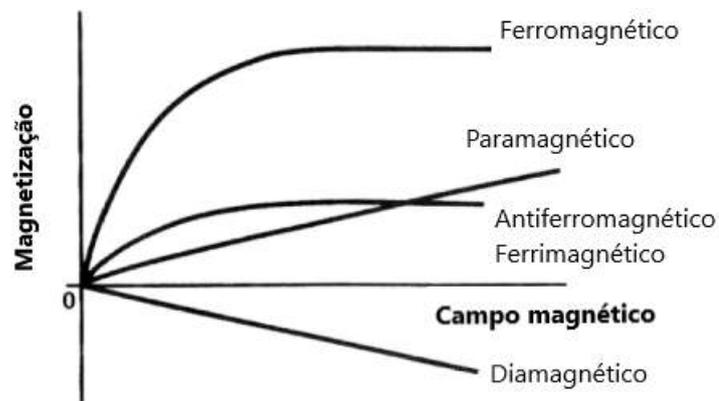


Figura 2.4: Curvas de magnetização para os tipos de magnetismo em materiais.  
 Fonte: Svoboda (2004).

De modo geral, comparando os tipos de magnetismo em materiais discutidos nesta seção, a Figura. 2.4 apresenta o comportamento da magnetização de um material quando submetido a um campo magnético (sem escala). Destaca-se que em praticamente todos os

casos, a presença do elemento ferro como componente da estrutura química do mineral é responsável pelo favorecimento das propriedades magnéticas. Na Tabela 2.2 serão apresentados alguns minerais e suas respectivas suscetibilidades magnéticas em função da massa para efeito de comparação e desenvolvimento do trabalho.

Tabela 2.2: Minerais e suscetibilidade magnética em função da massa.

Mineral	Suscetibilidade ( $m^3/kg$ )	Classificação
Quartzo	$-6,0 \times 10^{-9}$	Diamagnético
Limonita	$100 - 400 \times 10^{-9}$	Paramagnética
Siderita	$350 - 1500 \times 10^{-9}$	Paramagnética
Hematita	$250 - 3800 \times 10^{-9}$	Antiferromagnética
Magnetita	$14 - 18 \times 10^{-4}$	Ferrimagnética

Fonte: Adaptado de Gonzaga (2014), Svoboda (2004) e Lawver *et al.* (1974).

### Separadores magnéticos

Minerais com magnetismo natural ou propriedades magnéticas induzidas por polarização podem ser facilmente separados usando forças magnéticas. A força magnética exercida em uma partícula depende essencialmente da força do campo magnético, da suscetibilidade magnética do mineral e da mudança na força do campo (GUPTA & YAN, 2016). De acordo com Baik *et al.* (2012) uma expressão para a energia magnética de uma partícula ( $U_{mp}$ ), de permeabilidade  $\mu_p$  e de volume  $V_p$  em um campo magnético ( $H$ ) pode ser dada pela Eq. 2.6. Como se trabalha com polpas, a energia magnética de um volume fluido ( $U_{mf}$ ) de mesmo volume da partícula, isto é  $V_f$  igual a  $V_p$ , com permeabilidade magnética  $\mu_f$ , pode ser dada pela Eq. 2.7

$$U_{mp} = \frac{1}{2} \mu_p V_p H^2 \quad (2.6)$$

$$U_{mf} = \frac{1}{2} \mu_f V_p H^2 \quad (2.7)$$

Para partículas fracamente magnéticas, uma aproximação pode ser feita relacionado as Equações 2.6 e 2.7, e então uma energia do sistema é dada pela Eq. 2.8:

$$U = \frac{1}{2} (\mu_f - \mu_p) V_p H^2 \quad (2.8)$$

Em geral, a força magnética pode ser expressa pela Eq. 2.9, onde  $\nabla$  é o operador gradiente. Para um volume de material suscetivelmente magnético, a Eq. 2.9 pode ser reescrita pela Eq. 2.10 onde  $\chi_p$  e  $\chi_f$  são a suscetibilidade magnética da partícula e do fluido, respectivamente.

$$\vec{F}_m = -\nabla U \quad (2.9)$$

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 (\chi_p - \chi_f) V_p \nabla H^2 \quad (2.10)$$

Ainda, substituindo a  $H$  pela indução magnética ( $B$ ), tem-se:

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 (\chi_p - \chi_f) V_p B \nabla B \quad (2.11)$$

Como mostrado na Eq. 2.11, a força magnética em uma partícula fracamente magnética é proporcional à magnitude da densidade do fluxo magnético e do gradiente desse fluxo. Assim, pode-se obter um desempenho de separação magnética melhor, aumentando-se o campo magnético e ou seu gradiente. De modo geral, o campo magnético pode ser aumentado usando um ímã mais forte; aumentando o número de voltas de uma espira por exemplo, e o gradiente de campo pode ser aumentado alterando polaridades magnéticas e também por alterações de desenho na matriz magnética (BAIK *et al.*, 2012).

A separação magnética no meio mineral conta com dois tipos de processos, sendo eles por ímãs induzidos (convencionais) ou ímãs permanentes. A classificação destes equipamentos pode ser feita entre separação a úmido e a seco, e ainda pode ser dada por baixa ou alta intensidade (SVOBODA, 1987). Uma outra classificação importante é quanto o gradiente de campo magnético que é um importante parâmetro: pode-se supor que os separadores de baixa intensidade geralmente geram um gradiente de campo magnético baixo, enquanto os separadores de alta intensidade podem ser, em geral, classificados como máquinas de alto gradiente (SVOBODA & FUJITA, 2003). Svoboda e Fujita (2003) mencionam que a escolha de um tipo de um separador é dada por inúmeras considerações, sendo as mais importantes a distribuição do tamanho das partículas, as propriedades magnéticas das partículas a serem separadas umas das outras e o rendimento necessário da máquina. Os principais tipos de separadores magnéticos são apresentados a seguir.

**Separadores magnéticos de baixa intensidade a seco:** Separadores magnéticos de baixa intensidade apresentam uma densidade de fluxo magnético até 0,2 T e são elegíveis quando se trabalha com materiais ferromagnéticos, ou seja, materiais com alta interação magnética. O funcionamento de um separador magnético de baixa intensidade é dado por uma polia magnética que atrai os materiais com melhores propriedades magnéticas, este material permanece preso à polia e é liberado, por gravidade, em um local separado do material não magnético conforme apresentado na Figura 2.5.

**Separadores magnéticos de baixa intensidade a úmido:** Os principais representantes dos separadores magnéticos de baixa intensidade a úmido são os separadores a tambor (Figura 2.6). A utilização de equipamentos nesta configuração tem sido amplamente utilizada para o beneficiamento de minério de ferro rico em magnetita (FUERSTENAU & HAN, 2003; SVOBODA & FUJITA, 2003). De acordo com Svoboda e Fujita (2003) há duas configurações para o tambor

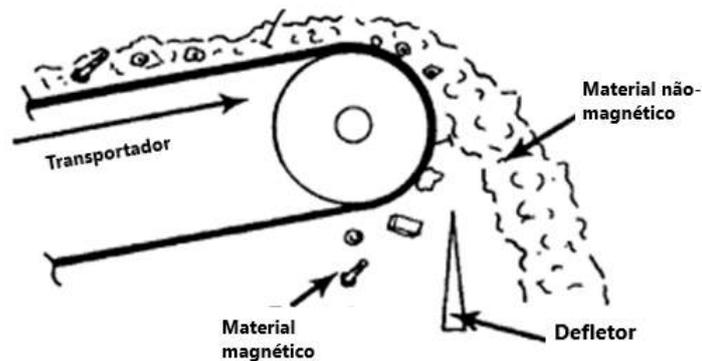


Figura 2.5: Polia magnética para separação de materiais fortemente magnéticos.  
 Fonte: Svoboda e Fujita (2003).

magnético baseadas na disposição dos polos dos ímãs e elas são radiais ou axiais: na disposição radial os polos alternam longitudinalmente no tambor enquanto que na axial, os polos alternam transversalmente. A configuração radial normalmente é usada quando o foco é na recuperação do material magnético. Já a configuração axial é preferida quando a qualidade do produto magnético é mais importante.



Figura 2.6: Separador magnético a úmido de baixa intensidade por tambor.  
 Fonte: Svoboda e Fujita (2003).

**Separadores magnéticos de alta intensidade a seco:** Separadores magnéticos de alta intensidade surgem devido à necessidade de a indústria mineral beneficiar minerais fracamente magnéticos. Esta classe de separadores magnéticos pode chegar a trabalhar com até  $2,0 T$  de campo magnético. Com o advento dos materiais magnéticos permanentes de terras raras,

tornou-se possível a construção de separadores de rolos magnéticos (ímãs permanentes) que geram uma força magnética que excede a produzida por separadores eletromagnéticos (ímãs induzidos) de alta intensidade (GUPTA & YAN, 2016; SVOBODA & FUJITA, 2003). Apesar do baixo consumo energético, estes separadores não conseguem separar partículas com diâmetros tão pequenos (tamanho mínimo do grão igual a 45  $\mu\text{m}$ ) como os de alto gradiente a úmido (tamanho mínimo do grão igual a 10  $\mu\text{m}$ ) (LUZ *et al.*, 2010).

**Separadores magnéticos de alta intensidade e alto gradiente a úmido:** Também conhecidos por *Wet High Intensity Magnetic Separator* (Separador Magnético de Alta Intensidade a Úmido) (WHIMS) ou *Wet High Gradient Magnetic Separator* (Separador Magnético de Alto Gradiente a Úmido) (WHGMS) são equipamentos desenvolvidos inicialmente na década de 1960 por G.H. Jones e que foram aprimorados ao passar do tempo por outros pesquisadores e podem trabalhar acima de 2,0 T (ZHENG *et al.*, 2017b). Tais máquinas trabalham com material úmido, ou seja, polpa de minério e tornam-se soluções para a demanda da indústria mineral relacionada ao beneficiamento de materiais fracamente magnéticos e partículas finas. Na área de concentração de minérios de ferro, a principal aplicação prática feita pela VALE acontece em usinas localizadas nos municípios de Itabira e Ouro Preto (MG), onde são usados separadores de carrossel, tipo Jones-Humboldt, na concentração de hematita. Equipamentos deste tipo permitiram à então Companhia Vale do Rio Doce, na década de 1970, aproveitar itabiritos, na época não considerados minério de ferro (LUZ *et al.*, 2010).

O funcionamento de separadores de alta intensidade se dá por um carrossel, a princípio horizontal, formado por matrizes magnéticas, que capturam o material de interesse (magnético). Este material é carregado pelo movimento do anel rotativo, sendo que as partículas com média afinidade magnética vão se desprendendo a medida que o campo vai diminuindo e àquelas com maior afinidade (concentrado) são descarregadas na posição determinada quando a matriz é lavada por jatos de água (Figura 2.7)

De acordo com Svoboda e Fujita (2003); Svoboda (2004), a introdução do conjunto de matrizes magnéticas no sistema de separação magnética é responsável por um grande avanço no beneficiamento de partículas consideradas muito finas e ou fracamente magnéticas pois estas matrizes são responsáveis pela formação de um gradiente de campo. Zheng *et al.* (2017b) afirmam que neste tipo de separador, as matrizes magnéticas de alta suscetibilidade desomogeneizam o campo magnético uniforme, induzindo um alto gradiente de campo magnético. As partículas magnéticas são capturadas na superfície das matrizes devido à grande força magnética, e ficam aprisionadas lá. As matrizes são geralmente feixes de placas corrugadas ou varetas de aço de alta suscetibilidade magnética (BAIK *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2011; ZENG & DAHE, 2003). Chen *et al.* (2013) afirmam que a matriz desempenha um papel importante no desempenho do separador.

Para Silva (2012), parâmetros de projeto de um WHIMS incluem o espaçamento da fenda na matriz, porcentagem de sólidos na alimentação, taxa de alimentação, intensidade de

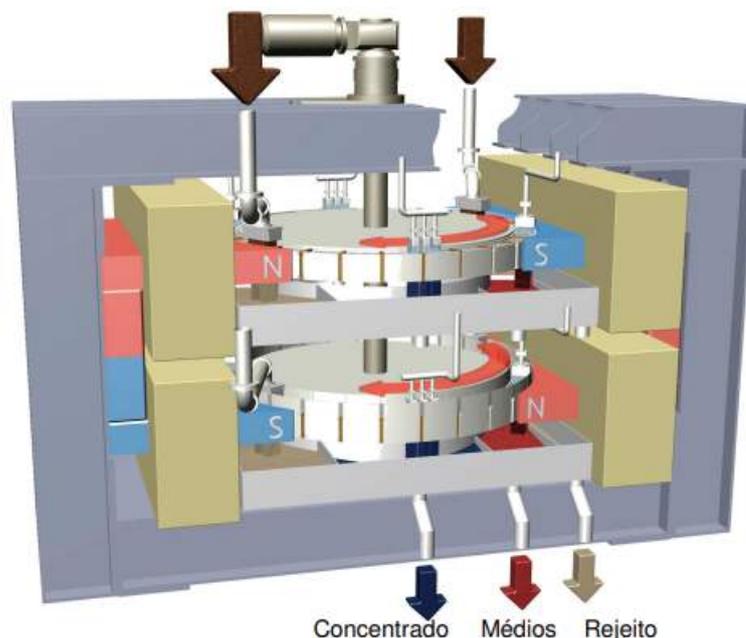


Figura 2.7: Separador Magnético de alta intensidade e alto gradiente (WHIMS).  
Fonte: Gaustec (2008).

campo magnético, velocidade de rotação do carrossel, pressão da água de lavagem. Todos estes parâmetros devem ser ajustados de acordo com cada projeto. Destacam-se alguns destes parâmetros como no trabalho de Svoboda (1994) com intensidade de campo magnético; concluiu-se que o aumento da intensidade de campo magnético pode melhorar a recuperação de partículas fracamente magnéticas, porém, caso o campo seja muito elevado pode haver uma redução da seletividade do material além de aumento do custo com energia elétrica sem melhora na eficiência. Já para a velocidade de rotação do carrossel deve-se observar que há uma relação de proporcionalidade entre esta velocidade e o tempo de exposição do minério ao campo magnético. Ressalta-se que a velocidade de rotação deve ser determinada por ensaios pilotos, podendo variar de 3 a 5,5 *rpm* e não deve ser utilizada como variável operacional, ou seja, deve ser fixa, de acordo com o projeto. De acordo com Silva (2012), a porcentagem de sólidos se limita a cerca de 60 % de sólidos em massa. Tal parâmetro implica em quanto menor a relação sólido/líquido podem-se obter melhores concentrados, porém tem-se também mais material magnético no rejeito o que diminui a recuperação metalúrgica. Já a água de lavagem deve apresentar volume e pressão suficiente para limpeza da matriz sem que haja desperdício. Esta lavagem ocorre na zona neutra (sem presença de campo) e pode ocorrer em uma zona intermediária, tomando cuidado com a questão de seletividade. Entre os problemas relacionados a esta etapa estão o entupimento de matrizes e baixa seletividade (FUERSTENAU & HAN, 2003; SVOBODA, 2004).

Como solução aos problemas apresentados no separador horizontal descritos anteriormente, surge na década de 1980, o separador magnético vertical.

**Separadores magnéticos verticais de alta intensidade e alto gradiente a úmido:** Separadores magnéticos verticais de alto gradiente foram desenvolvidos com o intuito de separar minerais finos e fracamente magnéticos. Segundo Zeng e Dahe (2003), os primeiros foram desenvolvidos em 1988 e estes equipamentos possuem um mecanismo que combina de campo magnético, fluido pulsante e gravidade para que de forma contínua beneficie materiais finos fracamente magnéticos. Eles apresentam como benefício um alto índice de recuperação mineral. Desde então, diversos esforços vêm sendo feitos para que haja uma promoção da melhoria destes equipamentos. Os separadores magnéticos verticais mais modernos são os *Vertical Pulsating High-Gradient Magnetic Separator* (Separador Magnético de Alto Gradiente Pulsante Vertical) ou simplesmente VPHGMS.

Um separador vertical é construído por um anel que contém matrizes, que são peças constituídas de filetes de aço, posicionadas em toda sua extensão, e nelas as partículas minerais se prendem após serem magnetizadas por um campo magnético, no caso, tanto a matriz quanto as partículas de minerais são magnetizadas no recipiente magnético (Figura 2.8). Mesmo após as matrizes deixarem a região de influência do campo magnético, o minério se mantém preso a elas devido à força de histerese magnética. Isto cria uma resistência à liberação do material das matrizes. Para que haja o processo de concentração mineral, jatos de água localizados no topo do equipamento removem as partículas de minério presas às matrizes. Na Figura 2.8 é apresentado um separador magnético vertical de alto gradiente do tipo VPHGMS e são indicados seus principais componentes.



Figura 2.8: Separador magnético vertical pulsante de alto gradiente (VPHGMS).  
Fonte: Adaptado de Outotec (2013).

### 2.2.3. Simulação computacional

Não somente em processos de mineração, mas como em vários processos industriais, o desenvolvimento de melhorias em equipamentos pode tornar-se um desafio devido a grandiosidade dos mesmos. Como solução para entender problemas reais destacam-se as simulações. Simulações são artifícios que permitem a modelagem computacional e então a realização de experimentos com o propósito de observar comportamentos e ou avaliar estratégias para operação. Portanto, a vantagem da simulação é a não necessidade da construção física prévia de um protótipo ou um modelo o que confere ganhos em tempo e dinheiro aliado a resultados confiáveis (JOHANSSON *et al.*, 2017; PEGDEN *et al.*, 1995; QUIST & EVERTSSON, 2016). Conforme Carter (2019) e Weerasekara *et al.* (2013), trabalhos recentes mostram que simulações numéricas permitem atingir soluções sólidas já que auxiliam na determinação dos variados pontos de decisão.

Como exemplo de aplicação de simulação computacional em separação magnética, cita-se o trabalho de Okada *et al.* (2005) que realizaram simulações em *Computational Fluid Dynamic* (Dinâmica de Fluidos Computacional) ou CFD para avaliar a separação magnética de alto gradiente. Os autores variaram alguns parâmetros como intensidade do campo magnético, velocidade do fluido. Também se permite citar o trabalho de Baik *et al.* (2012), que realizaram simulações computacionais via *Finite Element Method* (Método dos elementos finitos) ou FEM para calcular e visualizar o campo magnético e seu gradiente; na Figura 2.9, nota-se a distribuição do campo magnético ao redor dos pinos de uma matriz. Assim, a simulação auxiliará na construção de uma bobina e um sistema pino-minério que será desmagnetizado e desmagnetizado de modo a observar a intensidade do campo na região de interesse assim como o gradiente de campo.

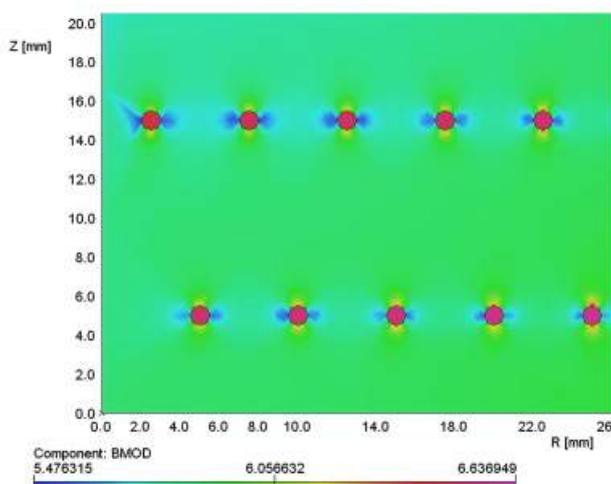


Figura 2.9: Distribuição do campo magnético ao redor dos pinos de uma matriz.

Fonte: Baik *et al.* (2012).

## 2.3. Materiais e Métodos

Apresenta-se neste capítulo a descrição do equipamento de estudo, dos materiais e dos procedimentos metodológicos empregados neste trabalho.

### 2.3.1. Caracterização do equipamento de estudo

As atividades desenvolvidas neste trabalho serão baseadas em um VPHGMS, equipamento similar encontrado nem algumas usinas de beneficiamento da Vale, como na usina da Mina de Brucutu, localizada na cidade de São Gonçalo do Rio Baixo, Minas Gerais. A Figura 2.10 apresenta, em detalhes, os componentes do equipamento.

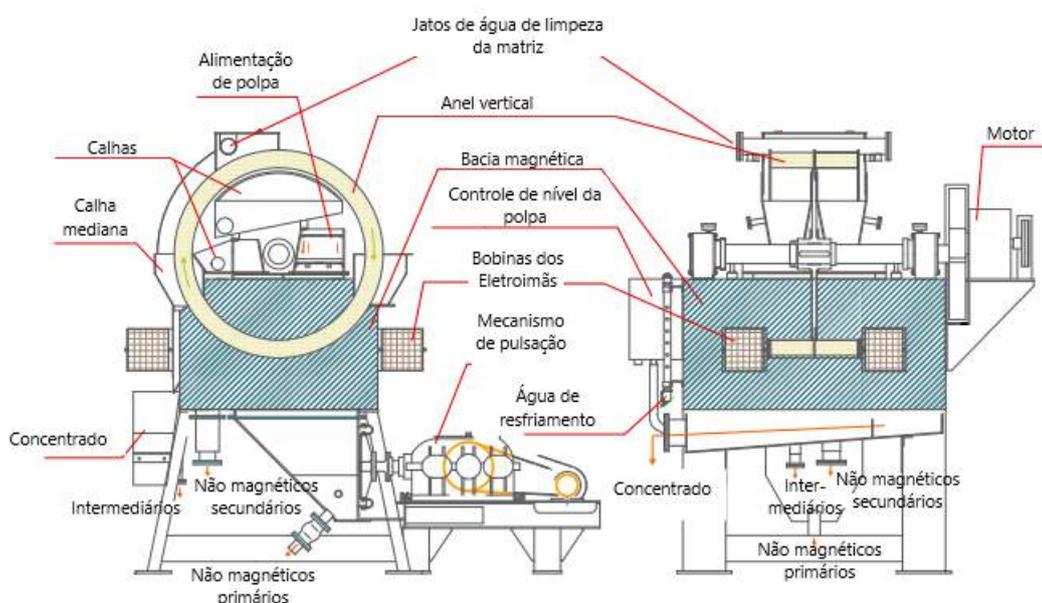


Figura 2.10: Componentes em detalhes de um VPHGMS.

Fonte: Adaptado de Outotec (2013).

O funcionamento detalhado de um VPHGMS se dá pela seguinte sequência: a polpa de minério é despejada em um recipiente que está imerso em um campo magnético, o qual magnetiza as partículas mais suscetíveis. O carrossel vertical, característico deste equipamento, apresenta um movimento rotacional que passa pelo recipiente magnético quando está em seu ponto mais baixo e aprisiona as partículas em matrizes construídas por filamentos de aço e posicionadas no contorno do carrossel (Figura 2.11). No recipiente também há um mecanismo de pulsação que promove a movimentação constante das partículas na polpa para maximizar seu aprisionamento nas matrizes, principalmente as mais finas. As partículas menos suscetíveis, não magnetizadas, se separam das demais, e viram rejeito. À medida que o carrossel rotaciona e as

matrizes se movimentam para fora da região de influência do campo magnético, as partículas de interesse se mantêm presas aos filamentos de aço devido à histerese magnética. Próximo ao topo, o fluxo de água é aplicado nas matrizes, para separar as partículas ainda presas. A etapa de separação mineral é feita a úmido; jatos de água são usados para separar as partículas de minério de alta concentração magnética do separador. O consumo de água é muito alto e necessita de processos posteriores para separação sólido e líquido do minério e isso acarreta em um aumento significativo dos custos de produção. Um fluxograma resumindo o funcionamento do equipamento é apresentado na Figura 2.12

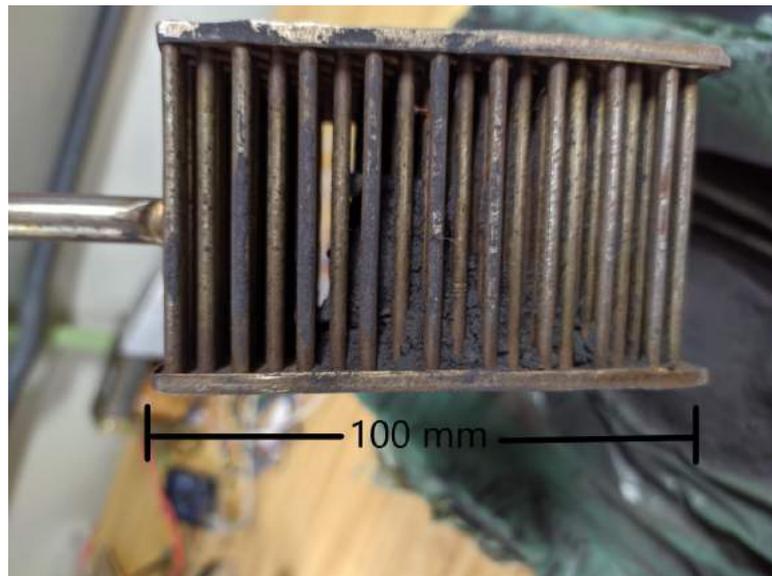


Figura 2.11: Matriz magnética.  
Fonte: o autor.

### 2.3.2. Metodologia

O desenvolvimento do trabalho abrangerá: (a) uma abordagem computacional (numérica) (b) uma abordagem experimental.

#### Abordagem computacional

Na solução por meio de métodos numéricos é desenvolvido um modelo computacional, representado por um sistema de equações fundamentadas em uma teoria matemática (ESSS, 2017). O objetivo de usar esta abordagem é encurtar a abordagem experimental e propiciar mais embasamento que a abordagem analítica.

Três modelos virtuais são desenvolvidos para este trabalho. O primeiro dará suporte à parte laboratorial para avaliação do campo magnético e magnetização do conjunto pino e minério (Figura 2.13). O segundo modelo é baseado em uma matriz do separador magnético que sofrerá um escoamento por (i) ar e (ii) por água (Figura 2.14) além de uma simulação de um injetor para escoamento do ar comprimido (Figura 2.15).



Figura 2.12: Fluxograma de funcionamento de um VPHGMS.  
Fonte: o autor.

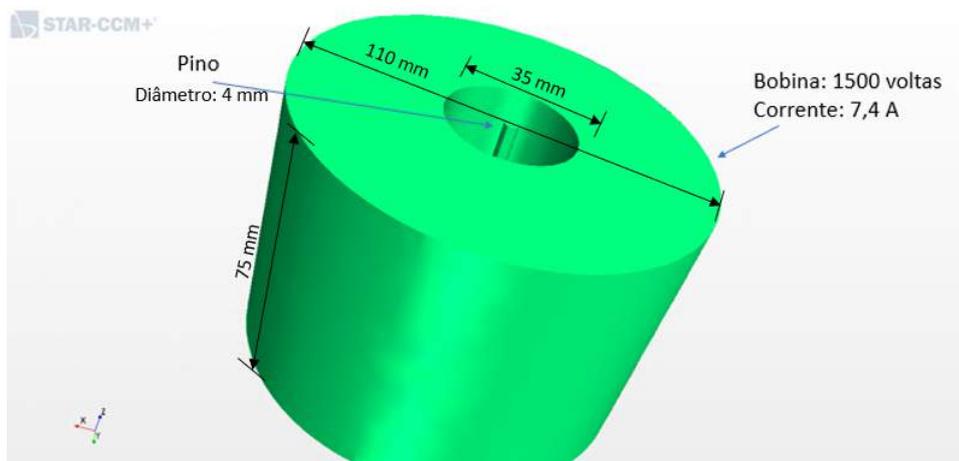


Figura 2.13: Modelo para magnetização do pino da matriz.  
Fonte: o autor.

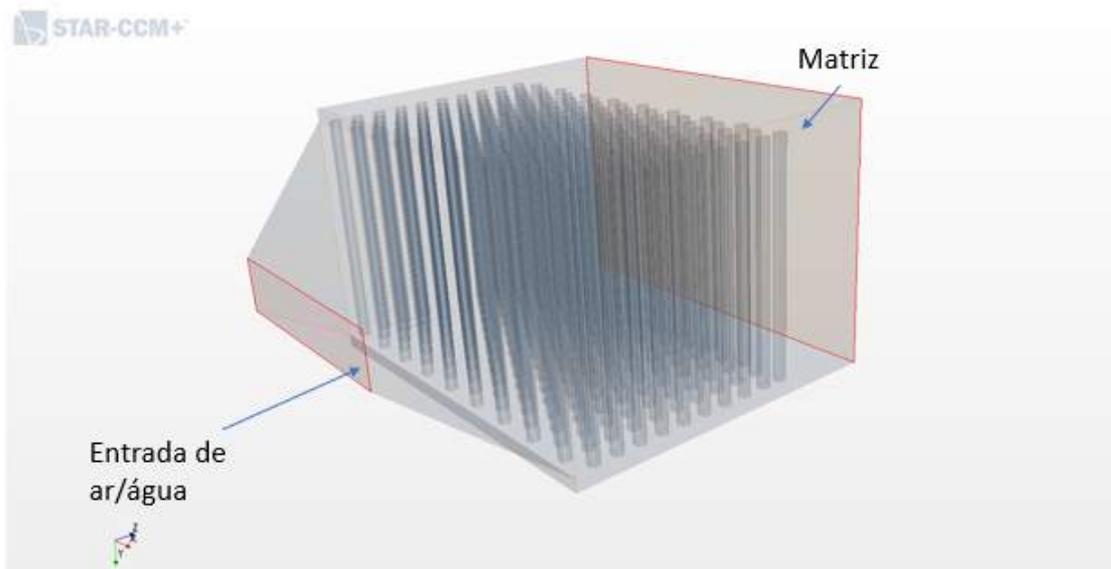


Figura 2.14: Modelo para escoamento de fluido na matriz magnética.  
Fonte: o autor.

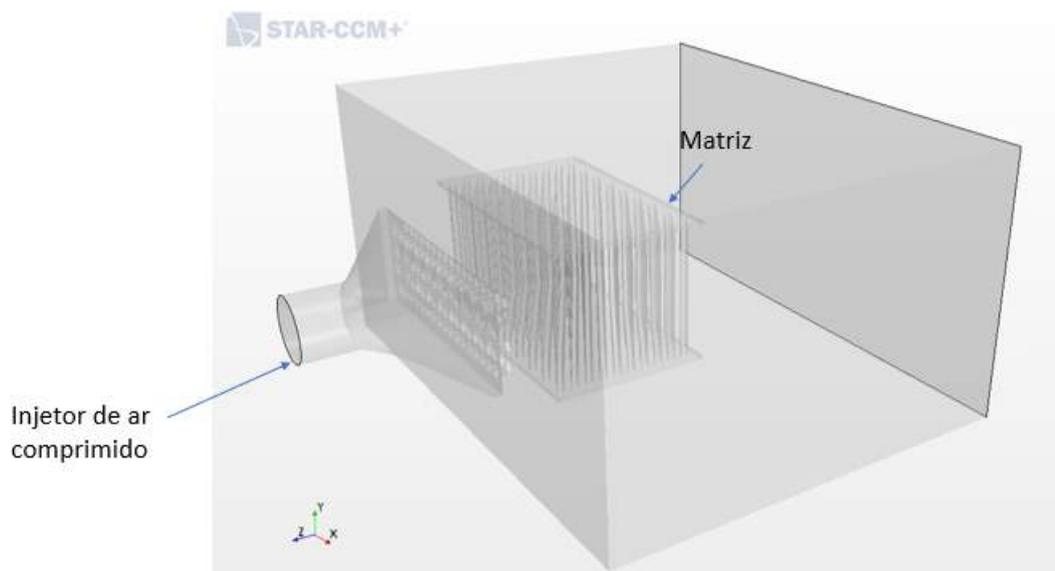


Figura 2.15: Modelo para escoamento de ar comprimido.  
Fonte: o autor.

No primeiro caso, os cálculos da simulação são baseados no eletromagnetismo clássico, enquanto que no segundo e terceiro casos utiliza-se da *Computational Fluid Dynamic* (Dinâmica de Fluidos Computacional) ou CFD, que se baseia na equação da continuidade da Mecânica dos Fluidos e das Equações de Navier-Stokes. Em todos os casos será utilizado o software comercial Star CCM+. Como caminho padrão para desenvolvimento de simulações mecânicas, carrega-se um arquivo com a geometria em três dimensões no software de simulação, gera-se uma malha com refinamentos nas áreas de interesse, definem-se as condições de contorno e então realiza-se a simulação para em seguida extrair os resultados. Para ambos os casos, vale-se de uma malha hexaédrica com tamanho do elemento base igual a  $0,01\text{ m}$ , refinada na região do pino, ou dos pinos (Figuras 2.16 e 2.17). Os parâmetros de entrada para os modelos são apresentados nas tabelas 2.3, 2.4, 2.5.

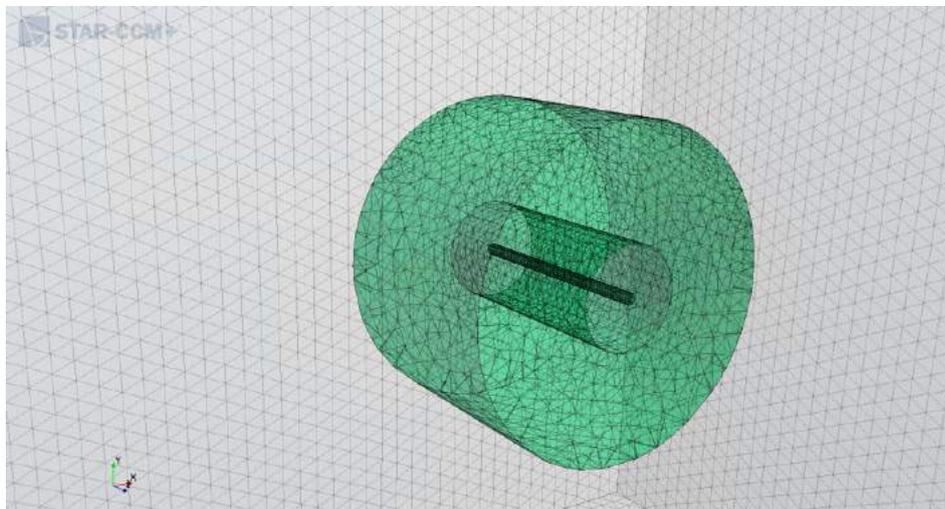


Figura 2.16: Malha gerada para a simulação da bobina/pino.  
Fonte: o autor.

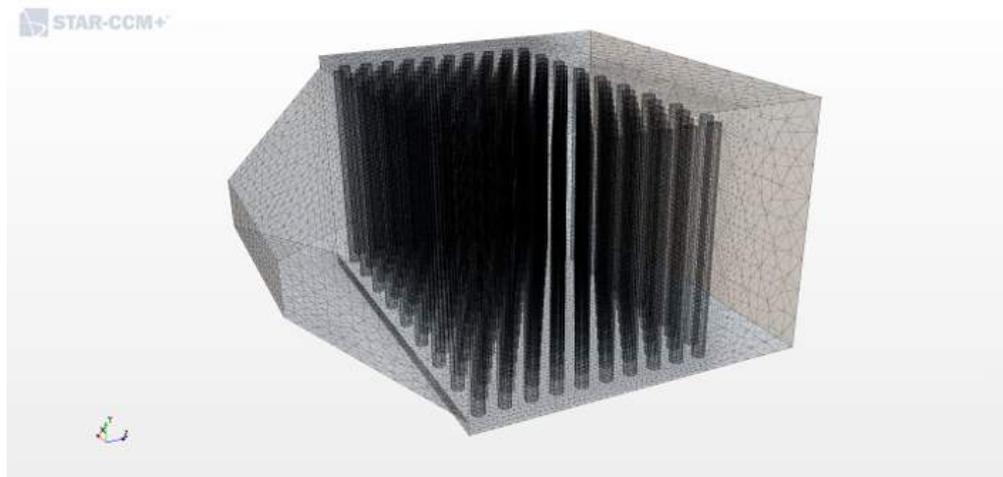


Figura 2.17: Malha para escoamento em uma matriz magnética.  
Fonte: o autor.

Tabela 2.3: Modelo computacional - Magnetização pino da matriz.

Parâmetro	Valor
Permeabilidade magnética no ar	$4\pi * 10^{-7} T.m/A$
Permeabilidade magnética do aço (relativa)	5000
Corrente elétrica	7,4 A
Número de voltas na bobina	1500
Regime	Permanente

Fonte: o autor.

Tabela 2.4: Modelo computacional - Escoamento ar.

Parâmetro	Valor
Massa específica do ar	$1,2 kg/m^3$
Viscosidade dinâmica do ar	$1,82 * 10^{-5} N.s/m^2$
Rugosidade relativa da parede	0,5
Condição de não escorregamento nas paredes	Sim
Regime	Permanente
Velocidade (entrada)	3000 m/s
Pressão atmosférica (saída)	101325 Pa

Fonte: o autor.

Tabela 2.5: Modelo computacional - Escoamento água.

Parâmetro	Valor
Massa específica da água	998,2 $kg/m^3$
Viscosidade dinâmica da água	1,002*10 <sup>-3</sup> $N.s/m^2$
Rugosidade relativa da parede	0,5
Condição de não escorregamento nas paredes	Sim
Regime	Permanente
Velocidade (entrada)	50 $m/s$
Pressão atmosférica (saída)	101325 $Pa$

Fonte: o autor.

### Abordagem experimental

Neste trabalho serão realizados ensaios em laboratório com um pino de uma matriz magnética com diâmetro igual a 4  $mm$  e altura igual a 75  $mm$  imersa em minério de ferro (hematita) que passará por um processo de magnetização. Para tanto, construiu-se uma bobina de altura igual a 70  $mm$ , diâmetro interno igual a 35  $mm$  com 1500 voltas de fio de cobre esmaltado AWG 18 (1,024  $mm$ ) que é ligada a uma fonte de energia como apresentada na Figura 2.18. No centro dessa bobina está imerso um recipiente (tubo) que será preenchido com o minério de ferro (hematita) e então será utilizado o maior valor de corrente permitido pela fonte (7,4 A) e será avaliado o efeito do campo magnético no conjunto minério-pino; na Figura 2.19 é mostrado em detalhe a disposição do minério de ferro e do pino que são posicionados centralmente na bobina. Tanto o pino e o tubo que receberá o minério quanto o sistema tubo mais minério e tubo mais minério mais o pino serão, previamente, pesados em balança de precisão e após a magnetização e desmagnetização também serão pesados a fim de saber a quantidade de minério capturado.

Portanto, a sequência do procedimento experimental será realizada seguindo os passos:

- 1º) Pesar o pino;
- 2º) Encher o tubo de minério;
- 3º) Pesar o conjunto tubo mais minério;
- 4º) Pesar o conjunto tubo mais minério mais pino;
- 5º) Magnetizar por 1 minuto (Fazer 3 vezes);

- 6º) Pesar o pino magnetizado com o minério;
- 7º) Desmagnetizar por 1 minuto (tubo, material e pino) (Fazer 3 vezes);
- 8º) Pesar somente o pino desmagnetizado;
- 9º) Calcular a média e o desvio padrão dos valores obtidos.

Ressalta-se que o tempo de 1 minuto para magnetização é um tempo maior que o anel vertical de um separador real permanece na região magnética e tal valor é definido para garantir a magnetização mantendo a segurança da operação, uma vez que há aquecimento da bobina devido a passagem de corrente elétrica. Para desmagnetização mantém-se o mesmo tempo.

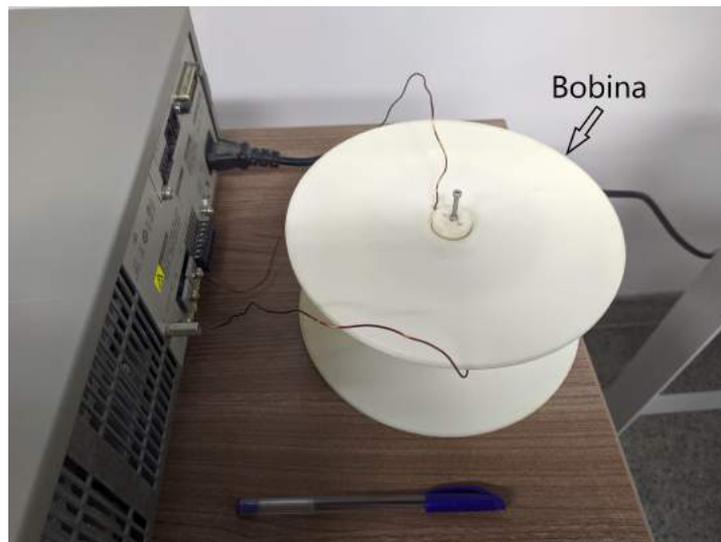


Figura 2.18: Magnetização do conjunto minério e pino.  
Fonte: o autor.

Após a primeira etapa, o recipiente contendo o conjunto pino-minério é levado para um desmagnetizador onde será realizada a desmagnetização (2.20). Ao fim desta etapa o pino também será pesado para identificar o tanto de minério que despreendeu-se. Destaca-se que a utilização de um fio da matriz para avaliação experimental é baseada nos trabalhos de Zheng *et al.* (2015, 2017b), que avaliaram a acumulação de partículas em um único pino da matriz via modelos computacionais. O isolamento de um único pino da matriz permite o trabalho laboratorial, uma vez que não se consegue chegar em laboratório, de acordo com os equipamentos disponíveis, a valores de campo magnético tão altos quanto no equipamento na área operacional.

Diante a análise dos experimentos, é proposto acoplar dispositivos para substituição da água de lavagem em um VPGHMS. Estes dispositivos serão um desmagnetizador plano, um limpador mecânico construído em hastes flexíveis e um injetor de ar comprimido que entrará no lugar dos jatos de água. A localização dos novos dispositivos pode ser visualizado na Figura 2.21.

Como proposto nos trabalhos de de Jesus Oliveira *et al.* (2012) e Lee *et al.* (2002), a utilização de ar comprimido em discos abrasivos rotativos para usinagem promove a redução

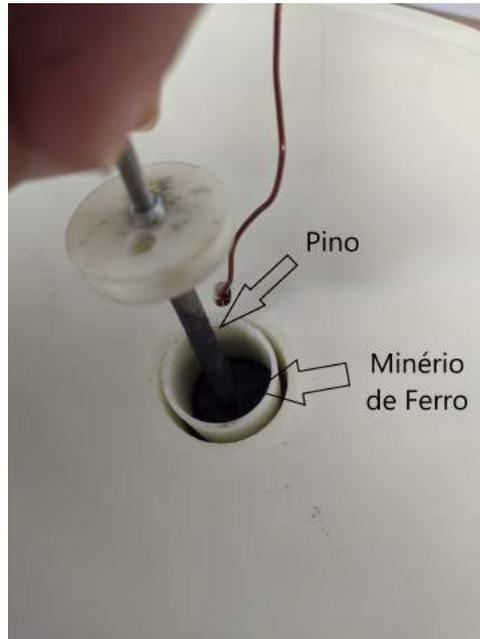


Figura 2.19: Detalhe pino da matriz e minério de ferro.  
Fonte: o autor.



Figura 2.20: Desmagnetização do conjunto minério e pino.  
Fonte: o autor.



## 2.4. Resultados

Os resultados obtidos a partir da coleta de dados são apresentados neste capítulo. Para melhor entendimento e análise, uma sequência de apresentação é descrita a seguir:

- 1 – Apresentação dos resultados dos testes da magnetização do pino da matriz tanto computacionalmente como experimentalmente.
- 2 – Apresentação dos resultados de simulação de escoamento dos fluidos na matriz.

### 2.4.1. Magnetização e desmagnetização do pino da matriz e minério de ferro

O intuito da realização da magnetização e desmagnetização do conjunto pino e minério de ferro é avaliar, de uma forma simplificada, a capacidade de soltura das partículas quando uma matriz é submetida a um processo de desmagnetização e então confirmar as hipóteses para seguinte teste em equipamento piloto.

A princípio é realizada a simulação computacional, utilizando os valores reais de diâmetro, número de voltas do fio da bobina e corrente aplicada baseada na fonte disponível para a parte experimental. A análise permite mostrar que o centro da bobina é a região de maior campo magnético (Figura 2.23) e onde o pino é posicionado. Para uma corrente de 7,425 A (valor máximo fornecido pela fonte de alimentação), obtém-se o maior valor do campo magnético, no centro da bobina, e então transmitido ao pino, sendo este valor próximo a 0,16 T.

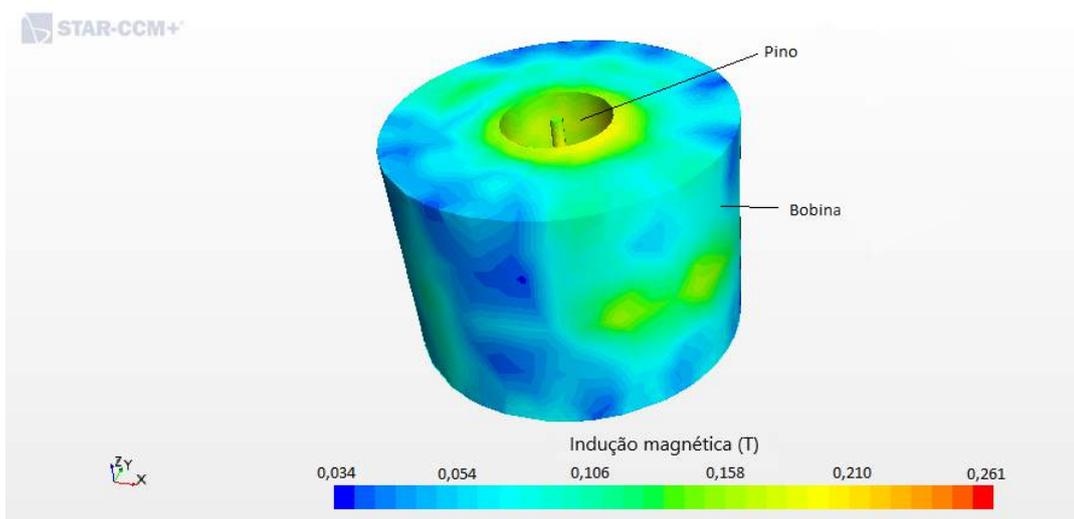


Figura 2.23: Modelo computacional: magnetização de um pino da matriz. Regime permanente.  
Fonte: o autor.

Sabendo-se da capacidade de magnetização do pino via simulação computacional e tendo-se o valor da indução magnética como referência, parte-se para a parte laboratorial: as massas dos objetos e dos conjuntos montados foram obtidas por meio de balança de precisão com três casas decimais e são apresentados na Tabela 2.6. Foram feitos três ciclos de

magnetização e desmagnetização mantendo o mesmo tubo para armazenamento de minério e mesma massa de minério. A quantidade de minério capturado pelo pino representa a diferença da massa entre o sistema minério e pino magnetizado e do próprio pino. Do mesmo modo, o minério restante no pino após a desmagnetização é igual a diferença da massa entre o minério e pino desmagnetizado e do próprio pino. A média das três medições de massa após a magnetização indicam que a massa do sistema pino mais minério apresentou valor igual a 12,837 g, com desvio padrão igual a 0,006 g. Já a média após a desmagnetização indicam que a massa do sistema pino mais minério apresentou valor igual a 12,771 g com desvio padrão igual a 0,019 g.

Subtraindo-se a massa do pino (12,708 g) dos valores médios apresentados anteriormente, chega-se que, em média, 0,130 g são referentes somente ao minério capturado pelo pino e a diferença entre esse valor e o minério restante no pino (0,063 g), indica uma liberação de 0,067 g de minério, que corresponde, a cerca de 52% da massa capturada. Tal resultado indica que há um sucesso na liberação do minério de ferro capturado pelo pino de uma matriz magnética após o processo de desmagnetização, mesmo que esse resultado indique cerca de metade da massa capturada. Tal resultado é satisfatório uma vez que já indica uma provável redução do consumo de água por um separador magnético.

Corroborando com os resultados obtidos na Tabela 2.6, uma análise visual do pino com o minério após a magnetização e após a desmagnetização, Figuras 2.24 e 2.25, respectivamente, permite-se notar a efetividade da desmagnetização no auxílio da soltura de partículas. Portanto, a partir dos resultados obtidos, infere-se, a princípio, que a aplicação de um desmagnetizador em um separador magnético vertical pode melhorar a eficiência de remoção de partículas e então reduzir o consumo da água de lavagem.

Diante os resultados laboratoriais alcançados, busca-se melhorar ainda mais a remoção de partículas ainda presas na matriz magnética após a desmagnetização. Para tanto propõe-se acoplar a um separador magnético vertical um limpador mecânico, localizado após a desmagnetização e antes da lavagem por ar comprimido. A ideia é que o dispositivo mecânico promova a limpeza das matrizes ao introduzir filamentos flexíveis no interior das mesmas. O dispositivo mecânico permanece fixo, junto à carcaça do separador magnético e os filamentos varrem todas as matrizes do carrossel devido ao movimento rotacional ininterrupto do anel vertical e os filamentos do dispositivo impelem o minério para uma segunda calha instalada.

#### **2.4.2. Escoamento dos fluidos na matriz magnética**

A fim de comparar o escoamento do ar comprimido, que é proposto neste trabalho, com o escoamento da água, conforme os separadores magnéticos trabalham atualmente, criou-se um modelo e como condição de contorno variou-se o fluido de entrada entre ar e água. Para a entrada da água adotou-se o valor de velocidade que gera uma pressão utilizada na prática igual a  $3 \times 10^5 Pa$ , e para o ar comprimido, igual a  $6 \times 10^5 Pa$ , que é o valor na linha de ar comprimido encontrado na indústria.

Tabela 2.6: Massas obtidas no procedimento experimental de magnetização e desmagnetização.

Material	Massa (g)
Tubo para armazenamento do minério	6,235
Pino	12,708
Tubo preenchido com minério	38,202
Massa pino e minério - Magnetização 1	12,844
Massa pino e minério - Desmagnetização 1	12,721
Massa pino e minério - Magnetização 2	12,829
Massa pino e minério - Desmagnetização 2	12,732
Massa pino e minério - Magnetização 3	12,840
Massa pino e minério - Desmagnetização 3	12,751
Média da massa do pino <b>magnetizado</b> com minério	12,838
Desvio padrão	0,006
Média da massa do pino <b>desmagnetizado</b> com minério	12,771
Desvio padrão	0,019

Fonte: o autor.



Figura 2.24: Pino com minério após a magnetização.  
Fonte: o autor.



Figura 2.25: Pino com minério após a desmagnetização.  
Fonte: o autor.

Nota-se nas Figuras 2.26 e 2.27 pelo plano médio da geometria que não há mudanças significativas em termos da configuração do escoamento, no entanto, percebe-se pela legenda que os valores de velocidade são muito maiores para o escoamento em ar e isso se deve às diferenças nas propriedades intensivas, e portanto, valores para escoamento do ar na configuração do injetor são inviáveis. Propõe-se a troca do bocal para a injeção de ar comprimido. Em termos de pressão (Figuras 2.28 e 2.29), os valores são mais próximos entre os dois fluidos o que indica a possibilidade da utilização do ar comprimido a  $6 \times 10^5 Pa$  para a limpeza da matriz magnética.

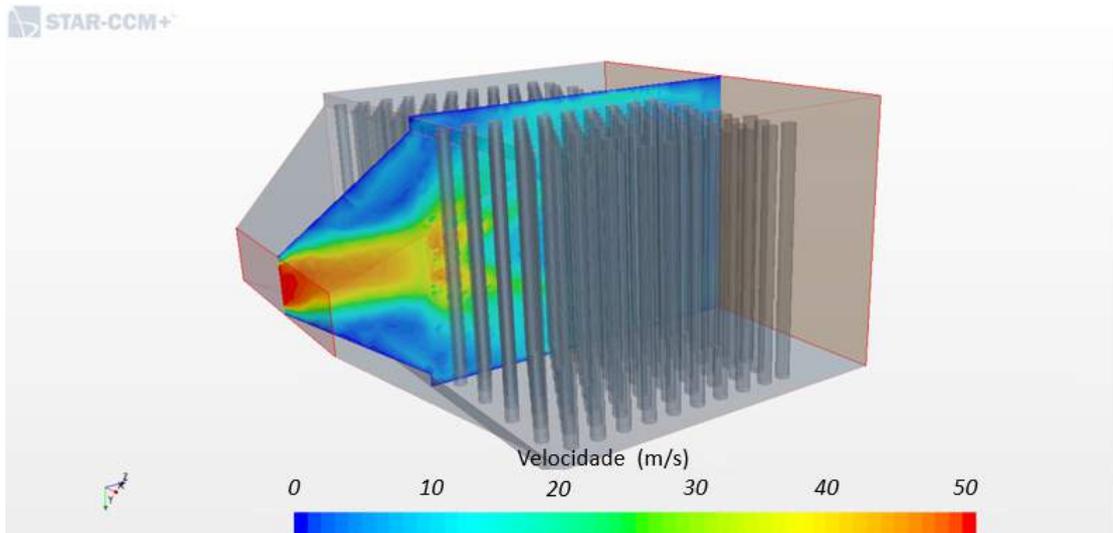


Figura 2.26: Escoamento da água na matriz magnética: velocidade relativa. Regime permanente após vencida a condição transiente.

Fonte: o autor.

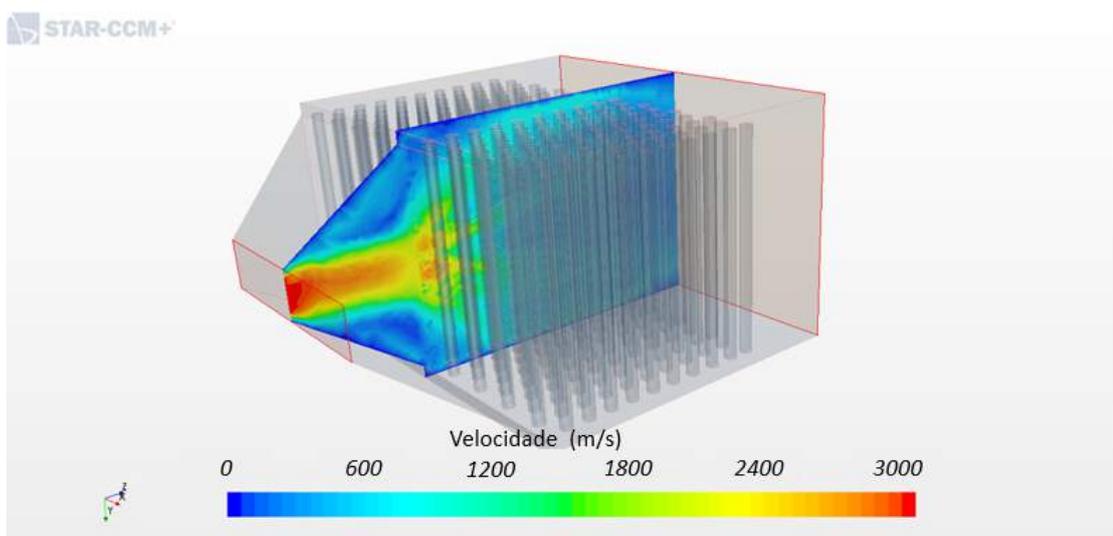


Figura 2.27: Escoamento do ar na matriz magnética: velocidade relativa. Regime permanente após vencida a condição transiente.

Fonte: o autor.

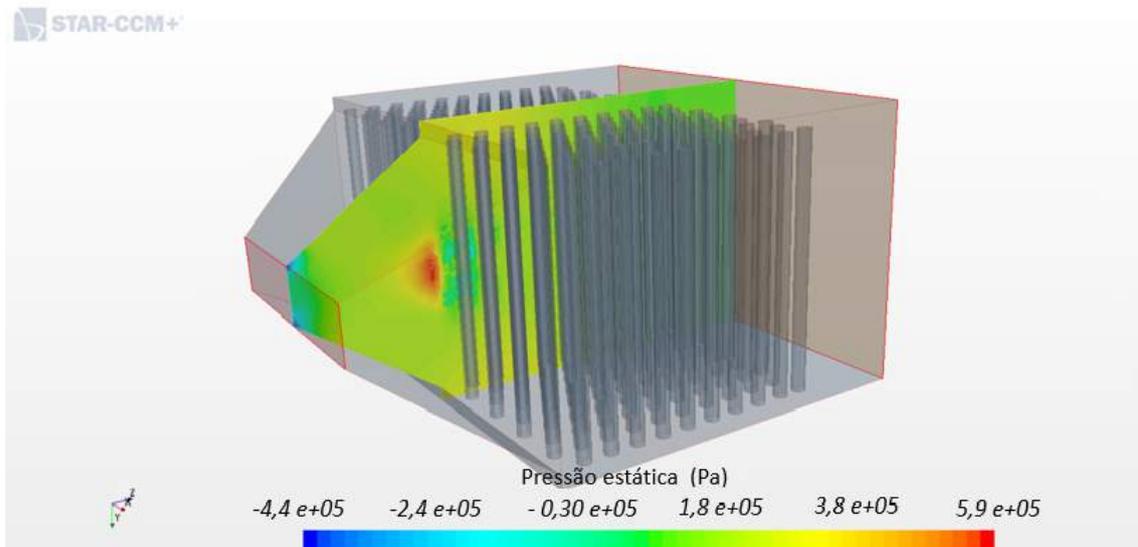


Figura 2.28: Escoamento da água na matriz magnética: pressão estática. Regime permanente após vencida a condição transiente.

Fonte: o autor.

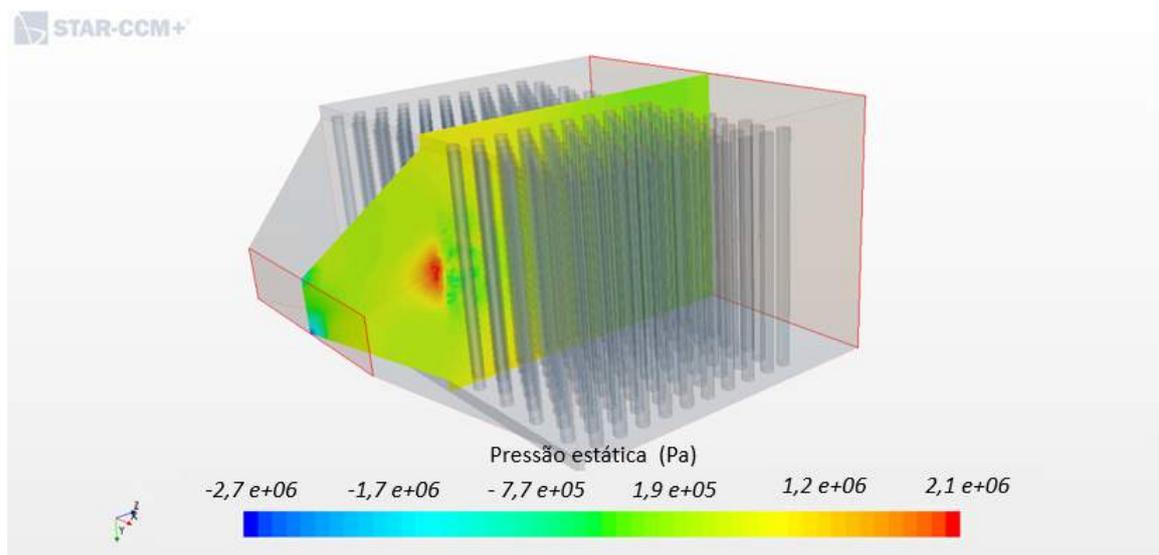


Figura 2.29: Escoamento do ar na matriz magnética: pressão estática. Regime permanente após vencida a condição transiente.

Fonte: o autor.

Ocorre que a água apresenta boas características para lavagem do minério já que consegue diluir o material e promover o arrasto das partículas para fora da matriz. Para que a lavagem por ar comprimido apresente uma boa eficiência, propõe-se um injetor com a configuração conforme apresentado na Figura 2.30 de modo que pequenos jatos sejam direcionados para dentro dos espaços da matriz magnética. O escoamento do ar ao ser direcionado para os locais de abertura na matriz permitem uma maior penetração do fluido e então maior limpeza (Figuras 2.31 e 2.32).

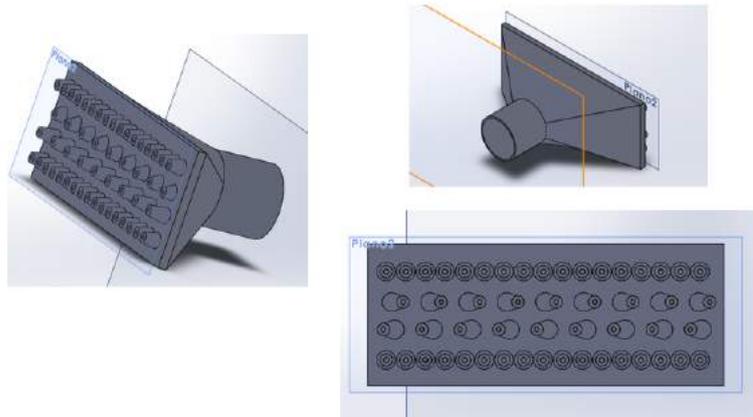


Figura 2.30: Injetor de ar comprimido proposto.  
Fonte: o autor.

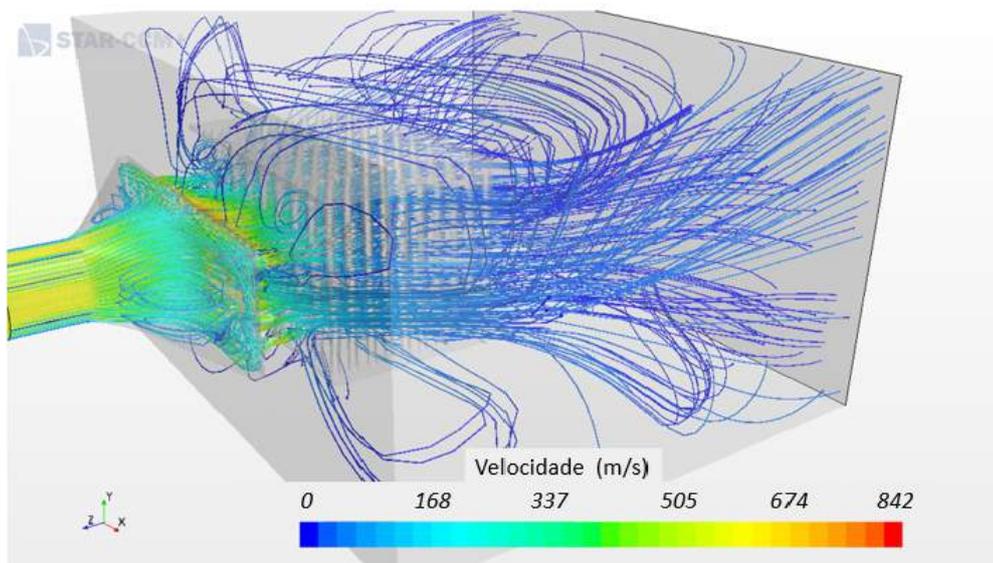


Figura 2.31: Escoamento do ar utilizando o injetor proposto. Regime permanente após vencida a condição transiente.  
Fonte: o autor.

Diante os resultados obtidos tanto na simulação computacional quanto nos experimentos laboratoriais partiu-se para a experimentação na área industrial, em um VPHGMS piloto, em escala reduzida. Para tanto, um desmagnetizador foi instalado no equipamento, e os resul-

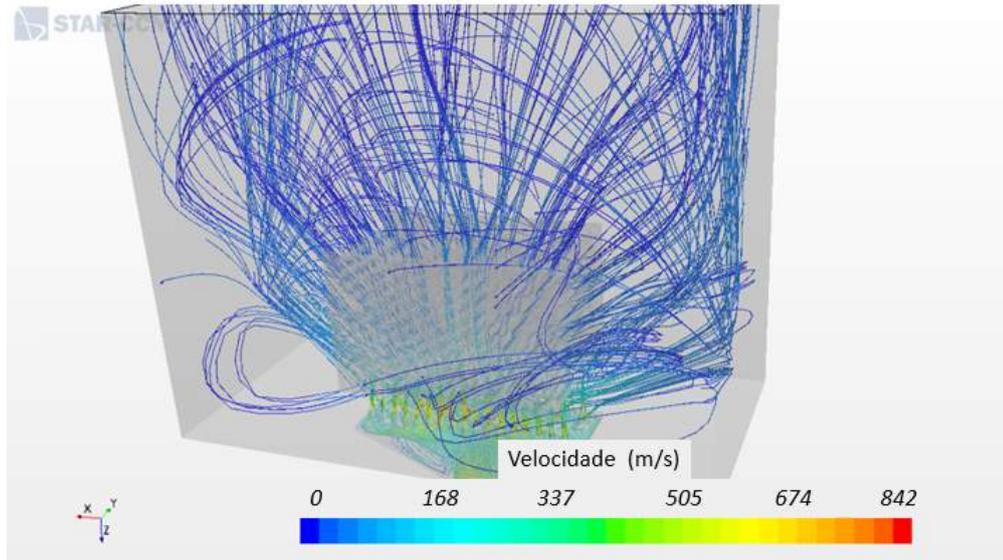


Figura 2.32: Escoamento do ar utilizando o injetor proposto, vista inferior. Regime permanente após vencida a condição transiente.

Fonte: o autor.

tados iniciais, apenas qualitativos, mostram que é possível realizar a separação sem uso de água de lavagem e sem a necessidade de ar comprimido, ou seja, o concentrado consegue se desprender da matriz com a desmagnetização. Destaca-se que mais testes serão feitos para maior embasamento desta etapa.

## 2.5. Conclusão

Conclui-se que a instalação de um desmagnetizador junto a um separador magnético vertical pode ser uma solução para redução do consumo da água de lavagem uma vez que este implemento gera um campo magnético alternado devido a aplicação de corrente alternada nas suas bobinas o que atrapalha a magnetização das partículas minerais e das matrizes magnéticas promovendo o desprendimento dessas partículas. De forma a auxiliar no escoamento das partículas ainda presas às matrizes magnéticas, a aplicação de ar comprimido pode ser considerada uma opção. Também é proposto o acoplamento de um limpador mecânico fixo, antes da injeção de ar comprimido, dotado de hastes flexíveis para contribuir com o processo de desprendimento do material concentrado.

Ressalta-se que ensaios preliminares em um separador magnético vertical piloto na área operacional mostraram que o desmagnetizador conseguiu promover o desprendimento das partículas minerais sem uso de água de lavagem e, confirmada a eficiência do mesmo em escala industrial, há também a possibilidade de eliminação de um espessador e quatro filtros prensa no processo de beneficiamento mineral.

Este trabalho, por ser considerado uma novidade, ou seja, não está contido no estado da técnica, por ser uma atividade inventiva, ou seja, não decorre de maneira evidente ou óbvia do

estado da técnica, por ter aplicação industrial e ter suficiência descritiva preenche os requisitos para patenteabilidade. Como produto gerado, a comprovação de um depósito de patente no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) relacionado a este trabalho é apresentada no Anexo A; no Anexo B é apresentada o texto completo da patente.

### **3. PARTE B: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL VIA MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (DEM): O CASO DE UM ALIMENTADOR DE SAPATAS E O CASO DE UMA PENEIRA VIBRATÓRIA**

#### **3.1. Introdução**

Nesta parte do trabalho são desenvolvidos dois projetos baseados em simulações computacionais via DEM, sendo a primeira aplicada a um alimentador de sapatas localizado na Mina de Serra Leste (Curionópolis, Brasil) pertencente à Vale a fim de avaliar o comportamento da vazão de material quando instalada uma comporta deslizante para regulação, neste caso, a simulação foi feita no software comercial Star CCM+; a segunda simulação é aplicada a uma peneira vibratória, comumente encontrada nas usinas de beneficiamento de minério de ferro, com o intuito de verificar o comportamento do peneiramento na presença de umidade no material e esta simulação foi realizada no software comercial EDEM.

#### **3.2. Modelos numéricos via DEM**

Métodos numéricos permitem avaliar esforços internos em elementos, comportamento dinâmico de fluidos como também permitem uma análise mais aprofundada das condições e dinâmica interna das máquinas que manipulam material particulado, que é assunto deste projeto. Destacando o método dos elementos discretos, este foi proposto originalmente por Cundall e Strack (1979) e desde então vem contribuindo para melhor compreensão dos processos operacionais envolvendo partículas, tanto para transporte, como para cominuição (CARTER, 2019; QUIST & EVERTSSON, 2016; WEERASEKARA *et al.*, 2013).

Tratando-se de material particulado, que é como o minério é trabalhado nas usinas, o método de elementos discretos (DEM) é indicado como suporte à simulação; o DEM é um método numérico de simulação que permite, entre outras coisas, uma análise da movimentação e esforços de partículas no interior de maquinários; o que inclui os diversos tipos de britadores, peneiras e correias. O DEM rastreia o movimento de todas as partículas em um sistema, mapeia as interações e contatos entre partículas e entre partículas e superfícies e então pode fornecer informações no nível das partículas, o que geralmente é difícil de ser alcançado por experimentos (DONG *et al.*, 2018; WASHINO *et al.*, 2017; WEERASEKARA *et al.*, 2013).

Atualmente as tecnologias de simulação numérica se mostram bem desenvolvidas graças ao avanço dos modelos analíticos, às técnicas de modelagem de equipamentos e aos próprios softwares de simulação. Tomando alguns exemplos atuais de aplicação de DEM, cita-se um trabalho relacionado com transporte de materiais realizado por Owen e Cleary (2009). Neste caso, os autores simularam a inclinação de um transportador de parafuso e é possível perceber o

comportamento diferente no carregamento das partículas. Nota-se na Figura 3.1 duas condições de funcionamento: sem inclinação e com 10° de inclinação. Também em um alimentador de parafuso, Kretz *et al.* (2016) realizaram simulações e as validaram por meio de experimentos; dentre as conclusões dos autores ressalta-se que a simulação de material particulado contribui para o desenvolvimento de melhorias em equipamentos de transporte de forma rápida e com baixo custo

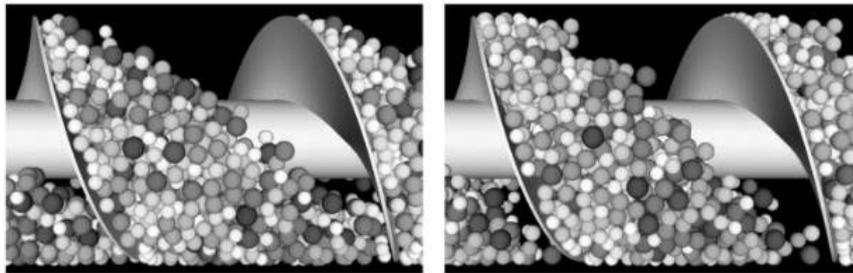


Figura 3.1: Transportador de parafuso: Sem inclinação (à esquerda) e 10° de inclinação (à direita).

Fonte: Owen e Cleary (2009).

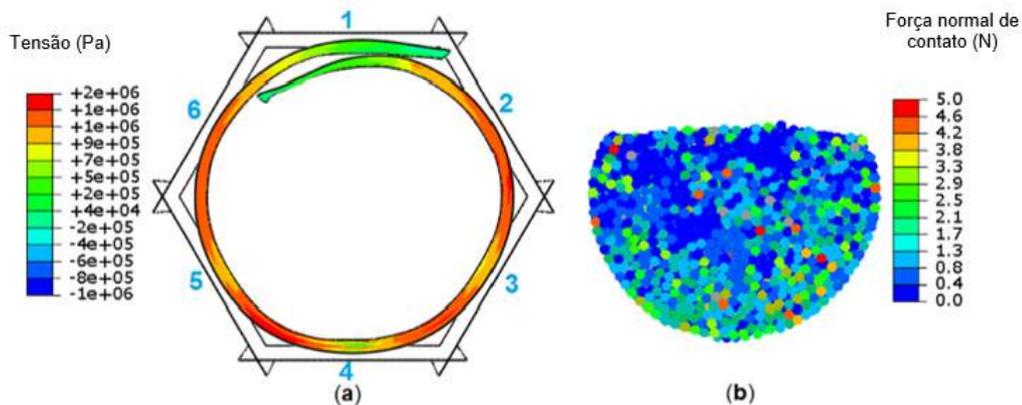


Figura 3.2: (a) Resultado da tensão na correia transportadora tubular (FEM). (b) Resultado da força normal de contato entre as partículas (DEM). Fonte: Zheng *et al.* (2017a)

Xiao *et al.* (2015) investigaram o efeito da descarga de partículas armazenadas em um silo, em um misturador de fitas. Neste trabalho os autores utilizaram o modelo de contato de Hertz-Mindlin e dois tipos de partículas com diferentes propriedades: um grupo com diâmetro uniforme igual a 18 mm e massa específica igual a 2600 kg/m<sup>3</sup> e outro com distribuição granulométrica com o diâmetro variando entre 30 mm e 60 mm e massa específica igual 2800 kg/m<sup>3</sup>, além da variação de outros parâmetros físicos. Os resultados mostraram que ao fazer a alimentação de partículas maiores, após as menores, pode-se obter um maior grau de mistura e tal conclusão pode ser aplicada na indústria. Outro trabalho é o de Zheng *et al.* (2017a) em que foram feitas simulações em uma correia transportadora tubular, para tanto, os autores utilizaram o

método numérico de elementos finitos (FEM) acoplados ao DEM para investigar a distribuição da força de contato na seção tubular conforme apresentando na Figura 3.2, sendo em Figura 3.2 (a) a apresentação dos resultados do método FEM e em Figura 3.2 (b) os resultados referentes ao método DEM. Neste caso, a análise por DEM mostra que as propriedades das partículas, como forma e coeficientes de atrito podem influenciar na transmissão de força no interior da correia transportadora tubular e então implicar em variação de tensão aplicada nas polias, principalmente na parte inferior da correia.

Já em equipamentos de britagem Quist e Evertsson (2016) modelaram (utilizando um scanner 3D) e simularam o comportamento das partículas de minério em um britador cônico por meio de um software comercial com o objetivo de entender o processo de britagem e as respostas operacionais. No caso, os autores realizaram uma comparação de duas configurações de abertura do britador e então obtiveram respostas como tamanho das partículas do produto, pressão hidrostática e energia consumida. A Figura 3.3 apresenta a modelagem do britador e das partículas desenvolvidos pelos autores.

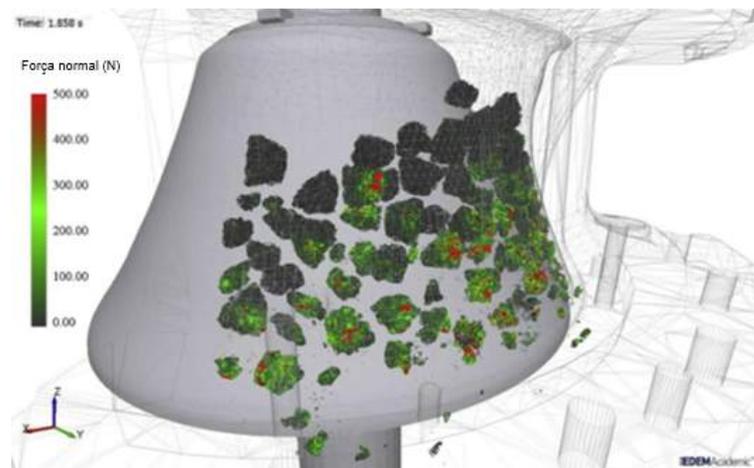


Figura 3.3: Modelagem e simulação de um britador cônico e suas partículas.  
Fonte: Quist e Evertsson (2016).

Identifica-se na Figura 3.3 que é possível obter uma modelagem com dimensões e detalhes do britador e das partículas. Também é possível a visualização de parâmetros de interesse, como a força normal, em Newtons, que é exibida na lateral da figura. Como o DEM considera a interação entre partículas e a interação superfície-partícula, a obtenção dos resultados desejados é viável.

Para peneiramento, cita-se Qiao *et al.* (2018) que simularam peneiras vibratórias com o intuito de avaliar o mecanismo de escoamento de material e seleção de partículas (Figura 3.4). Percebe-se na Figura 3.4 que os autores realizaram as simulações baseadas em dois modos de vibração, onde a peneira (a) apresenta maior turbulência no movimento das partículas quando comparada a peneira (b) que forma um leito mais uniforme. Tais observações podem contribuir com a tomada de decisão na escolha de um equipamento ou implementação de uma modificação.

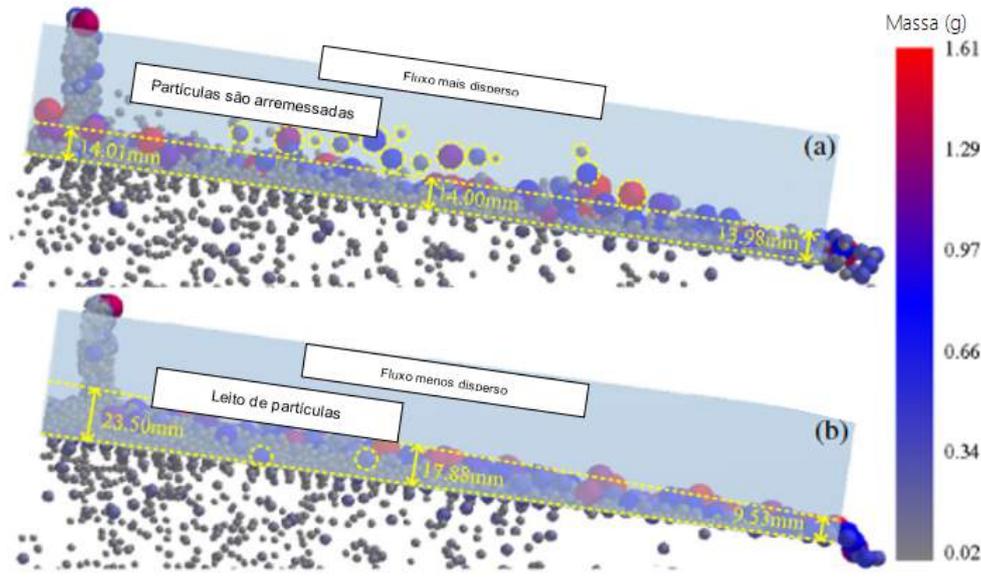


Figura 3.4: (a) Comparação entre dois modos de vibração de uma peneira vibratória via DEM. Fonte: Qiao *et al.* (2018).

A partir dos exemplos apresentados, da amplitude de aplicação e considerando a atualidade do tema, o desenvolvimento deste projeto pode contribuir com o avanço na solução de problemas via DEM, em especial para alimentadores, contribuindo tanto para a comunidade científica como na aplicação industrial.

### 3.3. O caso de um alimentador de sapatas

Usinas de beneficiamento de minério funcionam por meio de operações unitárias que incluem a cominuição, a classificação, a concentração e a separação sólido/líquido além de outras operações denominadas auxiliares. Estas operações sequenciais são arranjadas de forma a maximizar a recuperação dos minerais úteis presentes nos minérios de acordo com a qualidade requerida (VALADÃO & ARAÚJO, 2007).

Destacando-se as operações auxiliares, estas incluem o transporte de material sólido feito por correias transportadoras ou em forma de polpa por meio de bombeamento, além da estocagem do material em pilhas e em silos. No caso da estocagem em silos, o material é retirado por alimentadores, como os de correia ou de sapatas. Alimentação na mineração é essencialmente uma operação de transporte na qual é necessária uma regulação rigorosa da taxa de passagem. A taxa de passagem de minério tratado nos britadores, peneiras, classificadores, processos de concentração, entre outros, deve ser a mais uniforme possível a fim de se obter os melhores resultados em um processo de beneficiamento. Quando uma operação segue para a próxima mantendo a taxa de transporte, ou seja, taxa constante, não há a necessidade de um alimentador. No entanto, quando há entre as operações a necessidade de armazenamento, é ne-

cessário a interposição de um alimentador (FUERSTENAU & HAN, 2003; GAUDIN, 1939a).

Ainda que a função de um alimentador seja controlar a alimentação da operação subsequente, é comum a ocorrência de variabilidade severa da vazão de minério na alimentação em um circuito de britagem o que pode causar alguns danos operacionais: sobrecarga de correias transportadoras e peneiras, britadores intertravados, desgaste prematuro do equipamento e transbordamento de silos (FUERSTENAU & HAN, 2003). Por exemplo, é possível notar na Figura 3.5 a variação da quantidade de material em uma correia transportadora o que aumenta a variabilidade da taxa de entrega para os equipamentos além de ser prejudicial para a correia dado que o peso de sustentação nos rolos varia frequentemente com o tempo. Dados do ano de 2018 referente à usina da Mina de Serra Leste pertencente à Vale, localizada na cidade de Curionópolis, Brasil, mostram que do total de horas de paradas por questões internas, 57% estão relacionadas com a variabilidade da vazão de material.



Figura 3.5: Correia transportadora com grande variabilidade no fluxo de material.

Fonte: o autor.

De acordo com Fuerstenau e Han (2003); Gaudin (1939a); Metso (2019), os principais tipos de alimentadores são:

- Alimentadores de correia (*belt feeders*)
- Alimentadores de sapatas (*apron feeders*)
- Alimentadores de corrente (*chain feeders*)

- Alimentadores de mesa rotatória (*rotatory table feeders*)
- Alimentadores de parafuso (*screw feeders*)
- Alimentadores vibratórios (*vibratory feeders*)

Dentre os alimentadores, destaca-se o de sapatas; este equipamento consiste basicamente de uma cadeia de placas conectadas formando uma esteira (Figura 3.6) o que o faz muito robusto e recomendado para recebimento do material do ROM (*run-of-mine*). Normalmente estes alimentadores são instalados sob silos e moegas (que podem apresentar ou não tremonhas). Para descarga, o controle da taxa de descarregamento é feito pela subida ou descida de uma comporta e ou o controle da velocidade da esteira (FUERSTENAU & HAN, 2003; GAUDIN, 1939a).



Figura 3.6: Alimentador de sapatas.  
Fonte: Metso (2019).

Não somente em processos de mineração, mas como em vários processos industriais, o desenvolvimento de melhorias em equipamentos pode se tornar um desafio devido à grandiosidade dos mesmos. Como solução para entender problemas reais destacam-se as simulações. Simulações são artifícios que permitem a modelagem computacional e então a realização de experimentos com o propósito de observar comportamentos e ou avaliar estratégias para operação. Portanto, a vantagem da simulação é a não necessidade da construção física prévia de um protótipo o que confere ganhos em tempo e dinheiro aliado a resultados confiáveis (JOHANSSON *et al.*, 2017; PEGDEN *et al.*, 1995; QUIST & EVERTSSON, 2016).

Nessa etapa do trabalho, pretende-se estudar os efeitos na variabilidade da vazão de minério que sai de um silo e é transportado por um alimentador do tipo sapatas por meio de variações na abertura de uma comporta deslizante. Esse estudo é feito por intermédio de simulações via DEM com os dados de uma usina de beneficiamento de minério de ferro de Serra Leste. Wills e Finch (2015) afirmam que a taxa de descarga de um alimentador é controlada variando a velocidade ou a altura da faixa de minério por meio de uma comporta ajustável, no entanto, notou-se que, no alimentador objeto deste trabalho, responsável pelo recebimento

do material vindo da mina e encaminhamento para a britagem primária, não apresenta uma comporta ajustável, ou seja, não há controle na altura do leito de material. Apesar da importância prática para o setor mineral, não há na literatura nenhum estudo sobre alimentação na mineração com variação da altura do leito de material via DEM.

### 3.3.1. Hipóteses

Para o desenvolvimento desta pesquisa, duas hipóteses são formuladas:

- A instalação de uma comporta em um sistema de silo-alimentador de sapatas aumenta um grau de liberdade no controle da vazão de material.
- A simulação numérica via DEM indica as melhores condições operacionais para o sistema.

### 3.3.2. Objetivos

Como objetivo geral tem-se avaliar o comportamento de um sistema silo-alimentador de sapatas quando instalada uma comporta para controle de vazão de material.

No alcance desse objetivo contemplam-se os seguintes objetivos específicos:

- Construir um modelo computacional do alimentador de sapatas existente incluindo a instalação de uma comporta.
- Realizar simulações considerando diferentes cenários de funcionamento.
- Avaliar o funcionamento do alimentador diante os diferentes cenários.

### 3.3.3. Área de estudo

Este trabalho será desenvolvido no Corredor Norte da Vale, mais especificamente na usina de beneficiamento de minério de ferro da Mina de Serra Leste, município de Curionópolis, Pará. É apresentado na Figura 3.7 a localização do Projeto Serra Leste.

Atualmente, a usina de Serra Leste possui capacidade produtiva de seis milhões de toneladas por ano para produção de granulado e *sinter feed* (partículas com tamanho variando entre 0,15 mm e 6,3 mm). A instalação de beneficiamento mineral é composta pelas operações unitárias de britagem (britagem primária, secundária e terciária) e peneiramento (peneiramento primário e secundário), além de transportadores de correia, silos e chutes de transferência, responsáveis pelo manuseio do minério. Todo processo nessa usina é a seco, sendo todo minério vindo da mina transformado em produto, sendo este unicamente *sinter feed*. A alimentação primária da mina de Serra Leste é apresentada na Figura 3.8.

O sistema silo-alimentador está posicionado na entrada da usina de modo a receber o material vindo da mina, conhecido como ROM, e o encaminhar para o britador primário e para



Figura 3.7: Localização do Projeto Serra Leste.  
Fonte: Google Maps.



Figura 3.8: Alimentação primária da mina de Serra Leste.  
Fonte: Dados internos Vale.

o peneiramento primário conforme destacado no esquema da Figura 3.9. Percebe-se que o ROM é despejado por caminhões no silo que apresenta uma grelha fixa superior para impedir o escoamento de fragmentos de rocha maiores (a grelha fixa apresenta abertura igual a 600 mm). Um rompedor de maticos dá suporte ao desmonte de fragmentos grandes acumulados na grelha. O material passante acumula-se no silo e o alimentador o direciona para uma grelha vibratória prévia ao britador primário; o que passa pela grelha (*underflow*) é o material com granulometria mais fina e já é encaminhado para o peneiramento primário, já o material com granulometria mais grossa, que não passa pela grelha vibratória (*overflow*), é encaminhado para o britador primário para adequação granulométrica antes de seguir para o peneiramento primário.

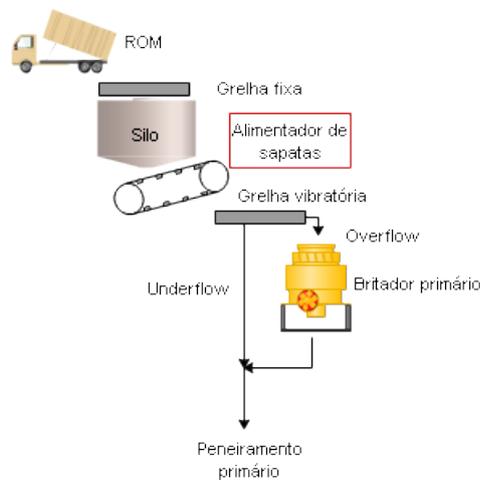


Figura 3.9: Esquema da britagem primária da usina de Serra Leste.  
Fonte: autor.

### 3.3.4. Metodologia

Para a modelagem e simulação do sistema silo e alimentador de sapatas mais a comporta deslizante, utilizou-se o *software* comercial Star CCM+ que possui suporte ao DEM. A modelagem do sistema é baseada nas dimensões reais do equipamento (Tabela 3.10). Na Figura 3.11 é apresentada além da modelagem do sistema, a malha gerada para simulação; no caso, valeu-se de uma malha poliédrica tendo os elementos tamanho base de 1 metro, sendo a malha padrão para simulação DEM neste software em específico, além disso a malha foi refinada na região da esteira do alimentador de sapatas; como há a velocidade do alimentador e para que a velocidade fique uniforme em todo plano da esteira, o refino neste ponto é necessário. Tal configuração é válida para todos os cenários a serem simulados.

Foram considerados três cenários referentes a abertura da comporta, assim tem-se cenário 1 com abertura de 1500 mm, cenário 2 com abertura de 1300 mm e cenário 3 com abertura de 1000 mm. Dentre os parâmetros de entrada no modelo, destaca-se as propriedades dos materiais, no caso, o aço da estrutura do alimentador e as partículas de minério (Tabela 3.1).

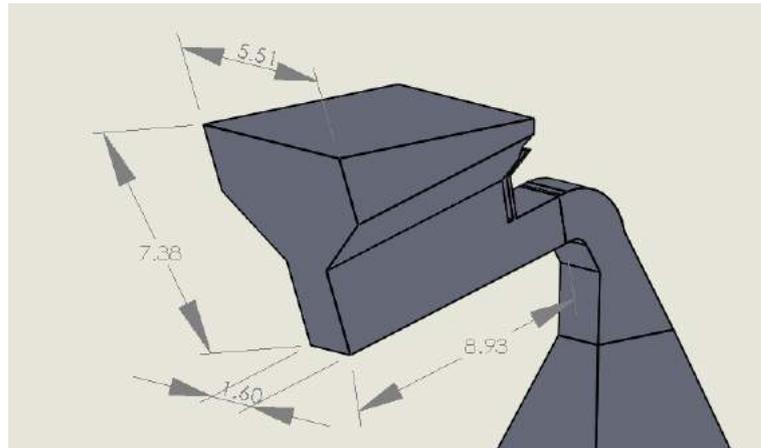


Figura 3.10: Modelo computacional: sistema silo alimentador de sapatas, unidades em metros.  
Fonte: o autor.

Tabela 3.1: Propriedades dos materiais

Propriedades dos materiais	Minério de ferro	Estrutura (aço)
Massa específica ( $kg/m^3$ )	2600	7830
Coefficiente de Poisson	0,35	0,29
Módulo de Young ( $Pa$ )	$5,57 * 10^8$	$2,0 * 10^{11}$

Fonte: o autor.

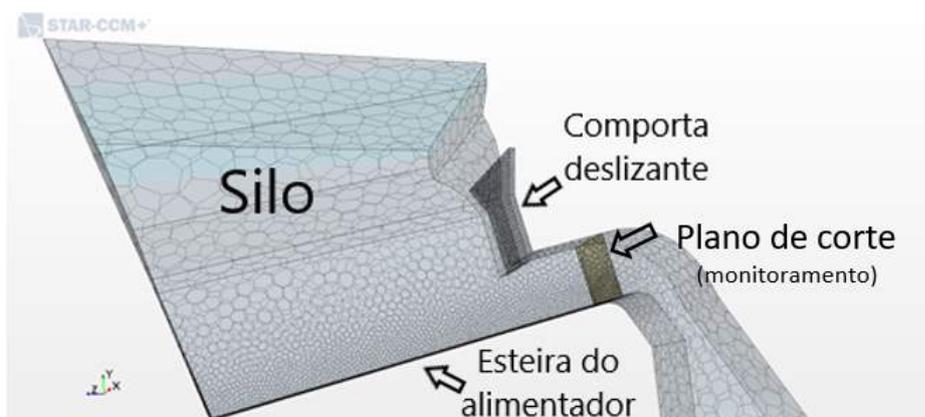


Figura 3.11: Malha do modelo computacional do sistema silo alimentador de sapatas.  
Fonte: o autor.

As forças de contato entre as partículas e a estrutura seguem o modelo de contato de Hertz-Mindlin; o modelo caracteriza as interações por meio de três coeficientes: de restituição, de atrito estático e de atrito de rolamento (CLEARY, 1998; HERTZ, 1881; MINDLIN, 1949; SANTANA *et al.*, 2015). De acordo com Santana *et al.* (2015), o modelo de Hertz-Mindlin, é composto por uma componente normal da força e é baseada na teoria de contato de Hertz (1881), enquanto a força tangencial é baseada no trabalho de Mindlin (1949) conforme Eq.(3.1). Há um termo de amortecimento do sistema, relacionado ao coeficiente de restituição (TSUJI *et al.*, 1992), que relaciona a velocidade de separação e a velocidade de aproximação de uma ou mais partículas em uma colisão. Assim, as forças entre duas esferas (A e B),  $F_{contact}$  são descritas pelas equações a seguir.

$$F_{contact} = F_n \mathbf{n} + F_t \mathbf{t}, \quad (3.1)$$

$F_n$  e  $F_t$  são as magnitudes das componentes normal e tangencial, respectivamente. A direção normal é definida pela força normal, (Eq.3.2), rigidez normal,  $K_n$ , (Eq.3.3) e amortecimento normal,  $N_n$  (Eq.3.4),

$$F_n = -K_n d_n - N_n V_n \quad (3.2)$$

$$K_n = \frac{4}{3} E_{eq} \sqrt{d_n R_{eq}} \quad (3.3)$$

$$N_n = \sqrt{(5k_n M_{eq})} N_{ndamp} \quad (3.4)$$

onde  $R_{eq}$  é o raio equivalente (3.5),  $M_{eq}$  é a massa equivalente (3.6),  $E_{eq}$  é o módulo de Young equivalente (3.7),  $N_{ndamp}$  é o coeficiente de amortecimento normal (3.8).

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}} \quad (3.5)$$

$$M_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} \quad (3.6)$$

$$E_{eq} = \frac{1}{\frac{1-\nu_A^2}{E_A} + \frac{1-\nu_B^2}{E_B}} \quad (3.7)$$

$$N_{ndamp} = \frac{-\ln(C_{nrest})}{\sqrt{\pi^2 + \ln(C_{nrest})^2}} \quad (3.8)$$

E sendo  $M_A$  e  $M_B$  as massas das esferas A e B,  $d_n$  e  $d_t$  são sobreposições nas direções normal e tangencial no ponto de contato,  $R_A$  e  $R_B$  os raios das esferas,  $E_A$  e  $E_B$  o módulo de Young das esferas,  $\nu_A$  e  $\nu_B$  os módulos de Poisson das esferas e  $V_n$  e  $V_t$  são as componentes de velocidade normal e tangencial da velocidade relativa da superfície da esfera no ponto de

contato e  $C_{nrest}$  o coeficiente de restituição normal, definido pelo projeto.

A direção tangencial é definida pela força tangencial (3.9), rigidez tangencial (3.10) e amortecimento tangencial (3.11),

$$F_t = \begin{cases} -K_t d_t - N_t V_t & \text{if } |K_t d_t| < |K_n d_n| C_{fs} \\ \frac{|K_t d_t| C_{fs} d_t}{|d_t|} & \end{cases} \quad (3.9)$$

$$K_t = 8G_{eq} \sqrt{d_t R_{eq}} \quad (3.10)$$

$$N_t = \sqrt{(5k_t M_{eq})} N_{tdamp} \quad (3.11)$$

onde  $C_{fs}$  é o coeficiente de atrito estático,  $G_{eq}$  é o módulo de cisalhamento equivalente (3.12),  $N_t$  é o coeficiente de amortecimento tangencial (3.13);  $C_{trest}$  é o coeficiente de restituição tangencial, definido pelo projeto:

$$G_{eq} = \frac{1}{\frac{2(2-\nu_A)(1+\nu_A)}{E_A} + \frac{2(2-\nu_B)(1+\nu_B)}{E_B}} \quad (3.12)$$

$$N_{tdamp} = \frac{-\ln(C_{trest})}{\sqrt{\pi^2 + \ln(C_{trest})^2}} \quad (3.13)$$

Para colisão entre partículas e superfícies, as equações mantêm-se as mesmas com o raio e massa da superfície definidas com valor infinito, o raio equivalente torna-se igual ao raio da partícula e a massa equivalente da superfície igual a massa da partícula. Os coeficientes de entrada utilizados nas simulações para o modelo de Hertz-Mindlin são apresentados na Tabela 3.2. Os coeficientes tem como base os valores utilizados nas simulações por DEM realizadas por Quist e Evertsson (2016) e Owen e Cleary (2009) com adaptações para o simulador de sapatas feitas por testes prévios do comportamento das partículas na simulação.

Já as condições da simulação, baseada em informações reais de trabalho são apresentadas na Tabela 3.3. Todos os cenários foram simulados com as mesmas condições: inicialmente foi feita uma descarga de 150 t de minério de ferro no silo para preenchê-lo em cerca de 40% do seu volume total, em seguida foram feitas 5 descargas, cada uma com 36t de minério, sendo o intervalo entre as descargas igual a 300 s e o tempo total simulado igual a 1400 s. Foi definida a velocidade do alimentador igual a 0,118 m/s conforme o regime de trabalho real do equipamento. Em relação às aberturas da comporta, tem-se o cenário 1 conforme é atualmente, ou seja, totalmente aberto (altura máxima permitida pelo equipamento), o cenário 3 relativo a um valor mínimo baseado no maior tamanho da partícula, ou seja, que não cause um agarramento, e o cenário 2 relativo a uma abertura intermediária proposta pela operação local.

De modo a tornar a simulação mais próxima da realidade, traçou-se uma distribuição granulométrica baseada em informações reais do material alimentado no silo e separou-se uma

Tabela 3.2: Parâmetros do modelo de Hertz-Mindlin.

Parâmetros	Minério- Minério	Minério- Estrutura
Coefficiente de atrito estático	0,5	0,7
Coefficiente de atrito de rolamento	0,5	0,7
Coefficiente de restituição (normal e tangencial)	0,2	0,5

Fonte: o autor.

Tabela 3.3: Condições da simulação.

Condições da simulação	Valores
Preenchimento inicial do silo	150 <i>t</i> (40% do volume do silo)
Demais descargas no silo	36 <i>t</i>
Número de descargas no silo	5
Intervalo entre descargas	300 <i>s</i>
Tempo total de simulação	1800 <i>s</i>
Velocidade do alimentador	0,118 <i>m/s</i>
Aberturas	Cenário 1 = 1500 <i>mm</i> Cenário 2 = 1300 <i>mm</i> Cenário 3 = 1000 <i>mm</i>

Fonte: o autor.

parcela representativa da porção superior variando de 37,5 mm a 600 mm. Não foi possível pegar uma faixa granulométrica maior devido a limitações computacionais. Dentro da faixa de distribuição, utilizou-se uma aproximação de Rosin-Rammler (3.14) conforme apresentado em pontilhado na Figura 3.12. Os parâmetros da equação de Rosin-Rammler obtidos foram expoente ( $q$ ) igual a 1,02 e diâmetro de referência ( $D_{ref}$ ) igual a 273 mm.

$$F(D) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{D}{D_{ref}} \right)^q \right] \quad (3.14)$$

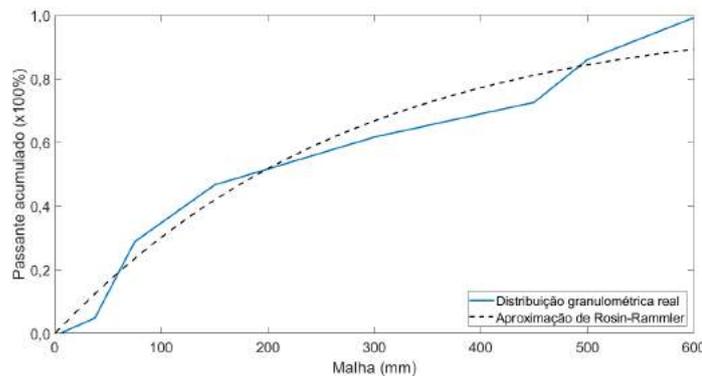


Figura 3.12: Aproximação de Rosin-Rammler para distribuição granulométrica.

Fonte: o autor.

### 3.3.5. Resultados e discussões

Após a finalização das simulações os resultados são extraídos do software e para as condições dos três cenários os resultados são apresentados. Nota-se na Figura 3.13 a situação após o enchimento do silo e a descarga de 5 caminhões de 36 t para o cenário 1. Percebe-se a variação da massa das partículas pela variação da cor das mesmas, ou seja, em azul as menores partículas e em vermelho as maiores.

É possível visualizar na Figura 3.13 que há uma tendência das partículas menores se movimentarem para o fundo da estrutura, fenômeno denominado estratificação. De mesmo modo, os resultados são apresentados para os cenários 2 e 3 nas Figuras 3.14 e 3.15. Nota-se dentre os três cenários uma diferença no preenchimento do silo, sendo que, como esperado, na menor abertura o silo encontra-se mais cheio. Outro fato a ser observado é o possível agravamento do fenômeno da estratificação uma vez que para menores aberturas, as partículas permanecem mais tempo no silo o que favorece a descida daquelas com menores tamanhos.

Tomando uma seção transversal do equipamento obtida através de um plano de corte que passa pela região de descarregamento de material (3.11), é possível visualizar a altura do leito de material para os três cenários no exato momento correspondente ao fim da simulação (Figura 3.16). Percebe-se que a variação da altura do leito de partículas ocorre conforme esperado,

sendo que para o cenário 1, encontra-se em torno de 1200 a 1400 *mm*, para o cenário 2 fica próximo a 1200 *mm* e para o cenário 3 a altura é cerca de 1000 *mm*. Neste último cenário identifica-se uma dispersão maior das partículas na parte superior que ocorre pelo fato das partículas serem arremessadas devido à menor abertura promover uma maior pressão entre estas para conseguirem ultrapassar a região da comporta.

Como parâmetro de monitoramento ao longo do tempo, a vazão em massa também é coletada; os dados brutos são apresentados na Figura 3.17, como relato da coleta de dados, onde é possível notar uma oscilação constante entre 200 e 1600 *s*, o que permite a análise dos dados contidos nesse intervalo. Apresenta-se também estes resultados em um gráfico boxplot na Figura 3.18. Por meio do gráfico boxplot constata-se uma redução da vazão em massa para a menor abertura, porém é difícil visualizar a variação da vazão em massa e assim, a estatística dos sinais obtidos são mostrados na Tabela 3.4.

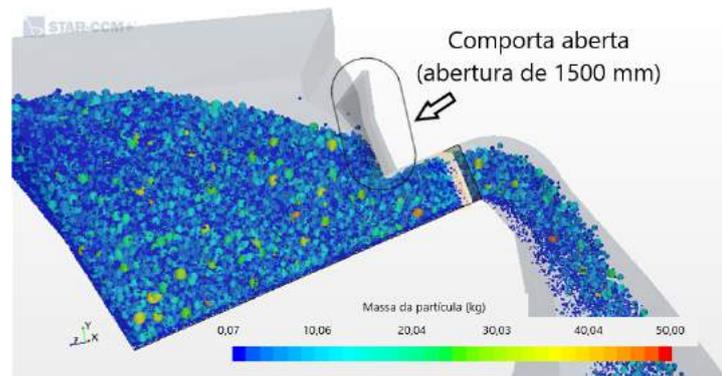


Figura 3.13: Sistema silo alimentador de sapatas - Cenário 1 ao fim da simulação.  
Fonte: o autor.

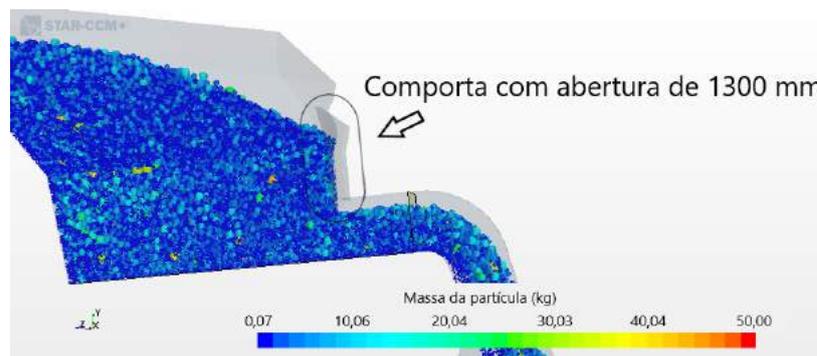


Figura 3.14: Sistema silo alimentador de sapatas - Cenário 2 ao fim da simulação.  
Fonte: o autor.

As informações apresentadas na Tabela 3.4 mostram que há uma significativa redução no desvio padrão da vazão em massa quando comparado os cenários 1 e 3, ou seja, há uma redução na variabilidade de 11,1%. Ainda é possível obter as médias móveis a partir dos sinais

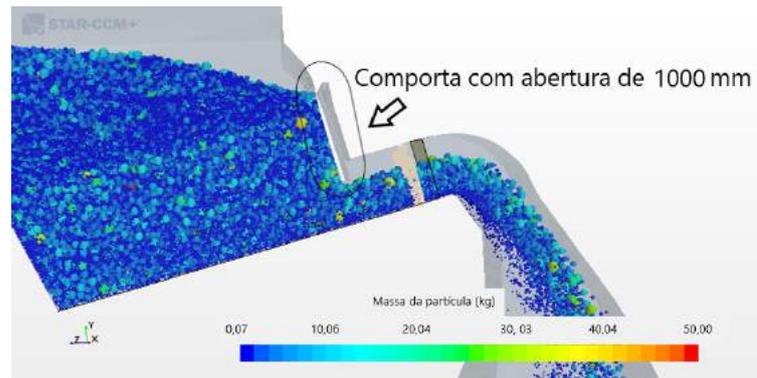


Figura 3.15: Sistema silo alimentador de sapatas - Cenário 3 ao fim da simulação.  
Fonte: o autor.

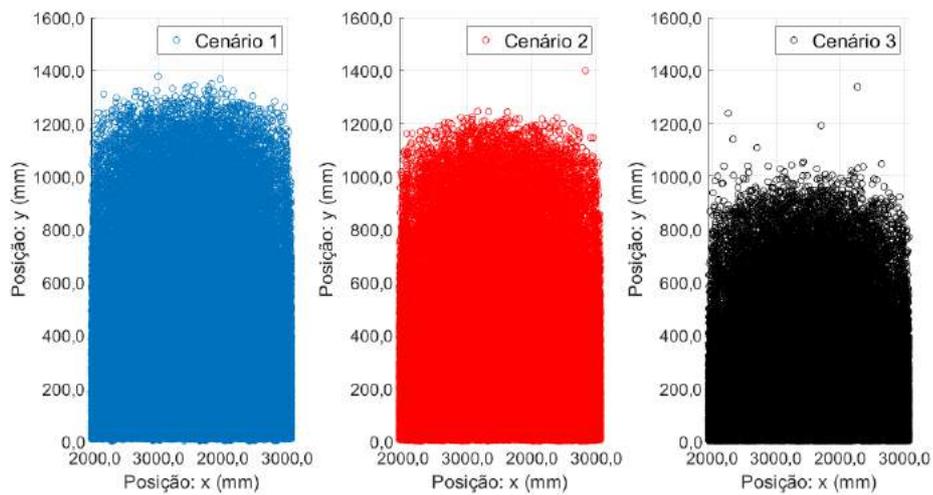


Figura 3.16: Altura do leito de minério para os três cenários.  
Fonte: o autor.

Tabela 3.4: Análise dos resultados

Vazão em massa	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Média ( $t/h$ )	1614,8	1483,6	1203,1
Média ( $kg/s$ )	448,6	412,1	334,2
Desvio padrão ( $kg/s$ )	171,1	155,0	152,1

Fonte: o autor.

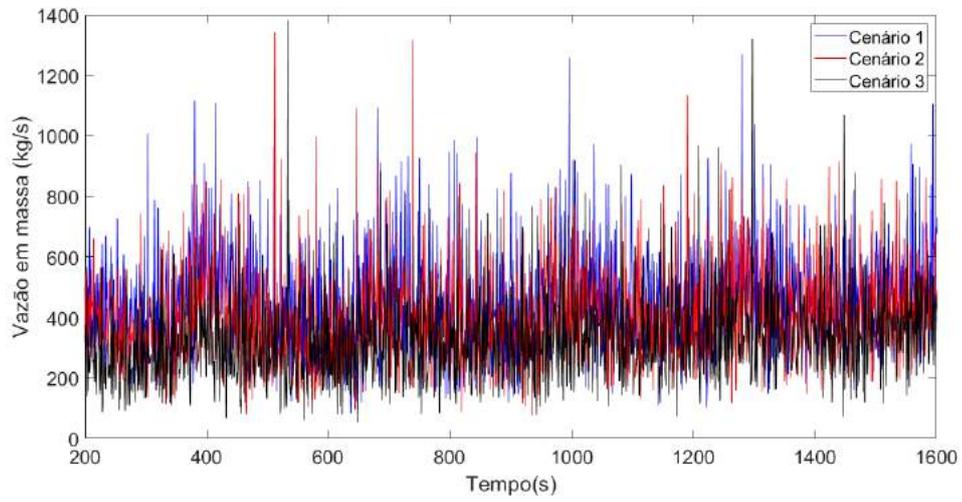


Figura 3.17: Dados brutos da vazão em massa para os três cenários.  
 Fonte: o autor.

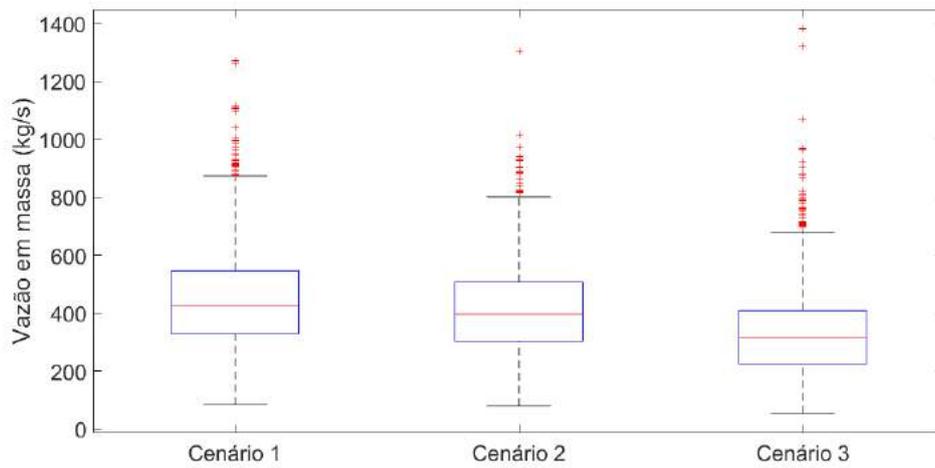


Figura 3.18: Boxplot da vazão em massa.  
 Fonte: o autor.

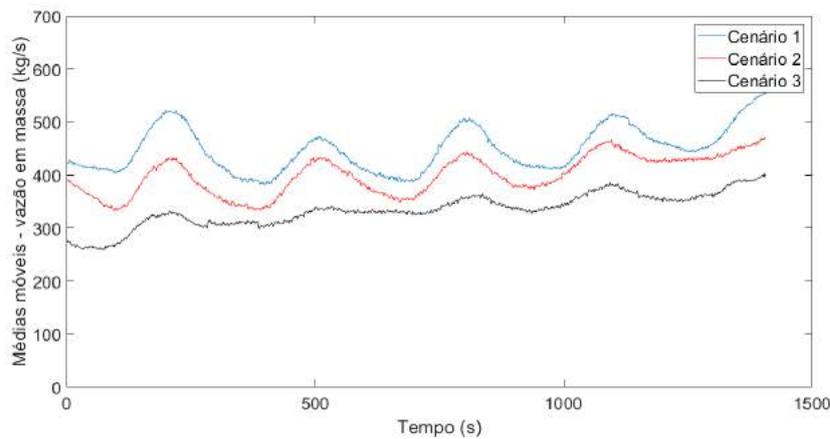


Figura 3.19: Médias móveis da vazão em massa para os três cenários.  
Fonte: o autor.

brutos. Para este caso, utilizou-se uma janela igual a 100 períodos o resultado é apresentado na Figura 3.19 e na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Análise dos resultados por médias móveis

Vazão em massa	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Média ( $t/h$ )	1613,3	1471,7	1203,1
Média( $kg/s$ )	448,1	408,8	334,2
Desvio padrão ( $kg/s$ )	41,5	37,0	31,0

Fonte: o autor.

Considerando as médias móveis, uma análise da variação do desvio padrão da vazão em massa entre os cenários 1 e 3 mostra uma redução de 25,0%. Por fim, plota-se na Figura 3.20 o histograma dos dados de vazão em massa com uma curva de ajuste de distribuição normal e é possível reparar que para a maior abertura (Cenário 1) há uma maior vazão em massa, porém com maior variabilidade. Já com a comporta mais fechada, consegue-se diminuir a variabilidade o que conseqüentemente gera uma redução na vazão. Para melhor comparação dos resultados apresentados na Figura 3.20, os cenários extremos, ou seja 1 e 3, são selecionados e plotados juntos conforme pode ser visto na Figura 3.21.

### 3.3.6. Conclusões

Conclui-se a partir dos resultados obtidos que a instalação de uma comporta com altura variável permite ao sistema ganhar um novo grau de liberdade no controle da vazão em massa de

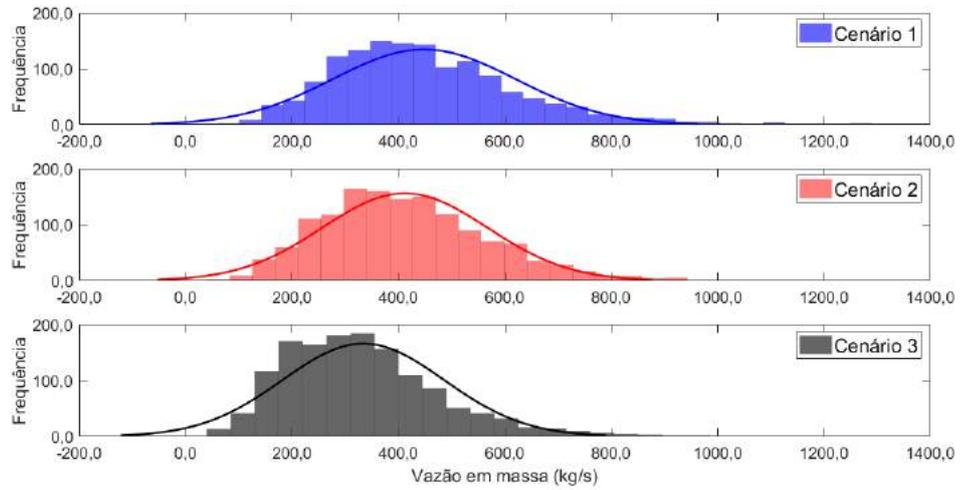


Figura 3.20: Histograma e curva de distribuição normal para os três cenários.  
Fonte: o autor.

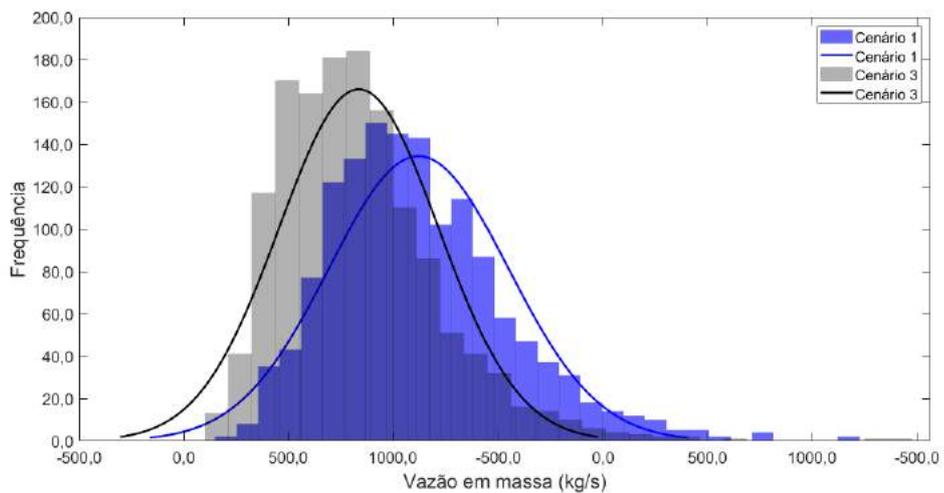


Figura 3.21: Histograma e curva de distribuição normal para os cenários 1 e 3.  
Fonte: o autor.

minério descarregado na próxima operação. Para a maior abertura (cenário 1) é nota-se a maior variabilidade da vazão em massa. Para uma abertura menor (cenário 3) é possível perceber a redução da variabilidade e, naturalmente, a redução da vazão de material. Destaca-se que para todos os cenários, a altura do silo acompanha a abertura da comporta: para a abertura maior, o silo tende a esgotar-se e para abertura menor há uma tendência de transbordamento. Conclui-se também que o maior tempo de residência do material no silo, que ocorre quanto menor a abertura, promove uma descida das partículas menores para o fundo do silo, chegando ao alimentador o que conseqüentemente direcionará primeiramente tais partículas para o britador, o que pode alterar a configuração de trabalho do mesmo. Propõe-se para trabalhos futuros um modelo que comunique a altura do silo de minério com a abertura da comporta de modo a manter uma taxa cada vez mais constante; basicamente, a comunicação implica em quando o silo estiver mais cheio pode-se ter uma abertura maior, evitando transbordamentos, e se o silo estiver mais vazio a comporta deve permanecer com a abertura menor para compensar a escassez de material e não gerar alta variabilidade na entrega.

Como produto gerado, a comprovação de um trabalho publicado no XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA (2020)) e a seleção deste trabalho para uma edição especial do Journal of Control Automation and Electrical Systems (JCAE) são apresentadas no Anexo A.

### **3.4. O caso de uma peneira vibratória**

Peneiras vibratórias são comumente encontradas nas usinas de beneficiamento mineral e garantem uma adequada qualidade dos produtos. O principal propósito de uma peneira é classificar as partículas de acordo com as suas formas e tamanhos (DAVOODI *et al.*, 2019; WILLS & FINCH, 2015). Durante o processo de peneiramento, muitos parâmetros operacionais podem afetar o desempenho: tais variáveis podem ser divididas em características do material e parâmetros do equipamento, que incluem as dimensões das telas, frequência de vibração, amplitude de vibração e inclinação; já as características do material estão relacionadas com a distribuição de tamanho das partículas, forma, densidade, vazão e umidade (ASBJÖRNSSON *et al.*, 2016; DAVOODI *et al.*, 2019). Destaca-se que cada partícula tem apenas as possibilidades de passar (*undersize*) ou ficar retida (*oversize*). Em termos de construção do equipamento "peneira vibratória", o mesmo é construído por um chassi robusto, apoiado em molas, um mecanismo acionador do movimento vibratório (motor) e apresenta de um a três suportes inclinados (*decks*) onde são instaladas as telas, conforme apresentada na Figura 3.22 (CHAVES, 2003; LUZ *et al.*, 2010).

Para realizar o peneiramento, uma peneira precisa executar três ações, sendo elas a de transporte das partículas de uma extremidade do *deck* até a outra, a estratificação do leito para que as partículas menores escoem para a tela aumentando a chance de peneiramento e, enfim, o peneiramento propriamente dito. O comportamento coletivo das partículas em uma peneira, conforme descrito anteriormente, é apresentado na Figura 3.23, onde é possível notar na parte

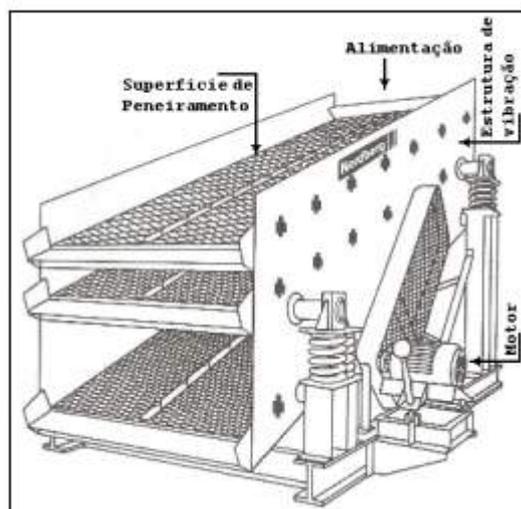


Figura 3.22: Esquema de uma peneira vibratória.  
 Fonte: Luz *et al.* (2010).

superior desta imagem, a estratificação ideal das partículas e na parte inferior a quantidade de material passante ao longo do comprimento do leito (CHAVES, 2003). Percebem-se três regiões distintas identificáveis por: estratificação, onde são peneiradas as partículas finas que atingem a tela primeiramente, seguindo para a região de saturação, quando o leito está totalmente estratificado e, por fim, a região de peneiramento por tentativas repetidas, onde se busca atravessar as partículas finas remanescentes.

De acordo com Chaves (2003), o peneiramento pode ser feito a seco, quando é considerada a umidade natural do material, ou via úmida, com grande quantidade de água inserida. Partindo-se do material seco e aumentando a umidade das partículas, a operação vai se tornando cada vez mais difícil e só volta a ser possível com a presença de 60% de água (Figura 3.24). Outro efeito da umidade é que as partículas não estão livres para se moverem individualmente, prejudicando o transporte do *oversize* sobre o *deck*. Os autores também destacam que quando há grande quantidade de partículas finas, o efeito da umidade é ainda mais sensível devido ao aumento da área específica das partículas.

Como apresentado no parágrafo anterior, a umidade presente no material a ser peneirado pode ser um fator complicador no funcionamento adequando de usina de tratamento mineral. Neste sentido, este trabalho busca avaliar o comportamento das partículas ao longo de uma peneira vibratória quando estas não estão nas faixas classificadas como secas. Para tanto, propõe-se a utilização de modelagem computacional e simulação via DEM em *software* comercial. Diferentemente do trabalho do alimentador de sapatas em que a simulação foi feita no *software* Star CCM+, aqui se utiliza o *software* EDEM, unicamente devido a disponibilidade da licença deste *software*, e não do outro, no momento da realização das simulações.

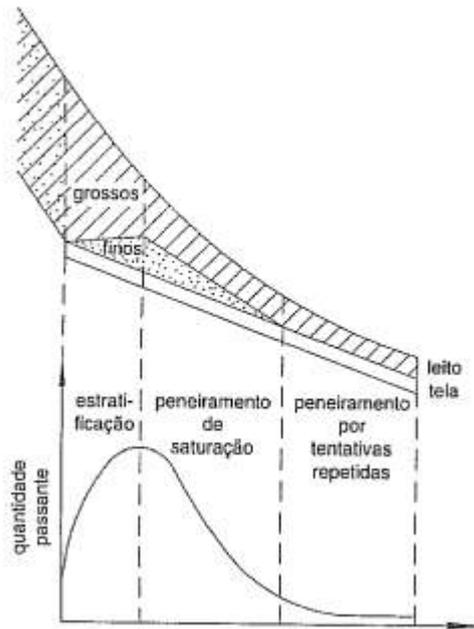


Figura 3.23: Comportamento coletivo das partículas em uma peneira.  
 Fonte: Chaves (2003).

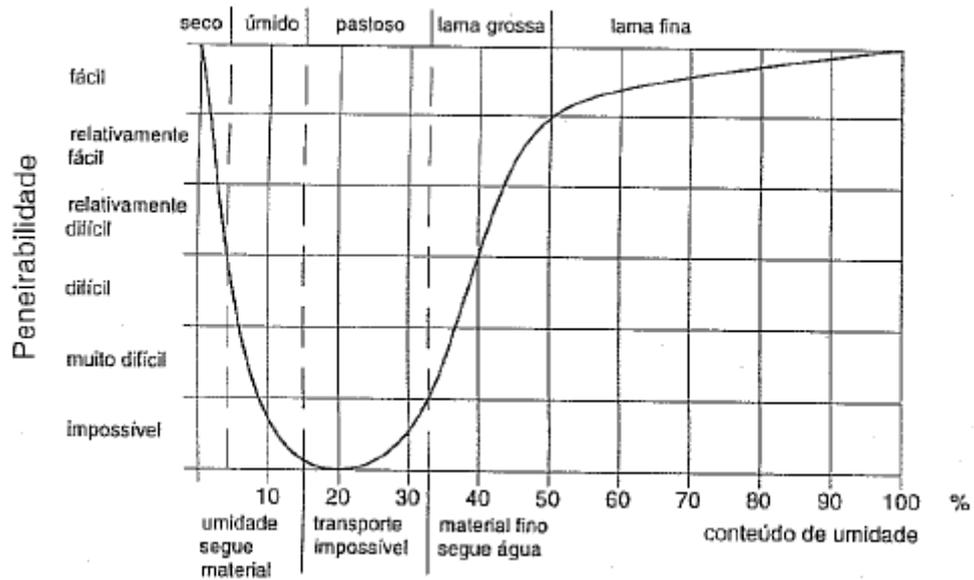


Figura 3.24: Efeito da umidade sobre o peneiramento.  
 Fonte: Chaves (2003).

### 3.4.1. Hipótese

Para o desenvolvimento desta pesquisa, uma hipótese é formulada:

- A simulação numérica via DEM indica o comportamento das partículas em uma peneira vibratória quando tais partículas estão secas ou úmidas, podendo esta umidade ser modelada pela variação do coeficiente de coesão.

### 3.4.2. Objetivos

Como objetivo desta etapa tem-se avaliar o comportamento das partículas de minério em uma peneira vibratória quando se varia o coeficiente de coesão que pode ser relacionado com a presença de umidade no material. No alcance desse objetivo contempla-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar simulações variando os valores de coeficiente de coesão entre partícula-partícula e partícula-estrutura.
- Avaliar o escoamento das partículas inseridas em uma peneira vibratória em função do nível de umidade do minério.

### 3.4.3. Metodologia

A peneira selecionada para simulação é uma peneira vibratória modular excêntrica com dimensões iguais a 2440 mm de largura e 9760 mm de comprimento, com dois *decks* (Figura 3.25). As telas do primeiro *deck* apresentam aberturas iguais a 45x45 mm e do segundo *deck* iguais a 22x22 mm; a frequência de vibração é de 40 Hz e amplitude de vibração igual a 6 mm; a alimentação é constante igual a 220 kg/s. A modelagem e simulação serão feitas em escala real e é definido no software EDEM um tempo de 30 segundos de funcionamento da peneira .

As geometrias das partículas de minério foram aproximadas ao formato de uma esfera como apresentado na Figura 3.26 pois a construção da forma das partículas no software EDEM se dá pela união de partículas esféricas menores. Como o número de partículas interfere na velocidade do processamento da simulação e considerando que esta simulação será feita em escala real, optou-se por simplificar o formato das mesmas e então atingir uma distribuição granulométrica com uma maior faixa, mesmo que não chegue ao menor diâmetro. A distribuição granulométrica real (distribuição real genérica, obtida em área operacional Vale para peneira com aberturas iguais às propostas nesse trabalho) e a utilizada como parâmetro de entrada da simulação são apresentadas na Figura 3.27. A distribuição usada na simulação tem como menor diâmetro de partícula igual a 0,004 m, este valor foi configurado por já apresentar um grande número de partículas finas geradas e diâmetros menores inviabilizaram a simulação devido a capacidade de processamento.

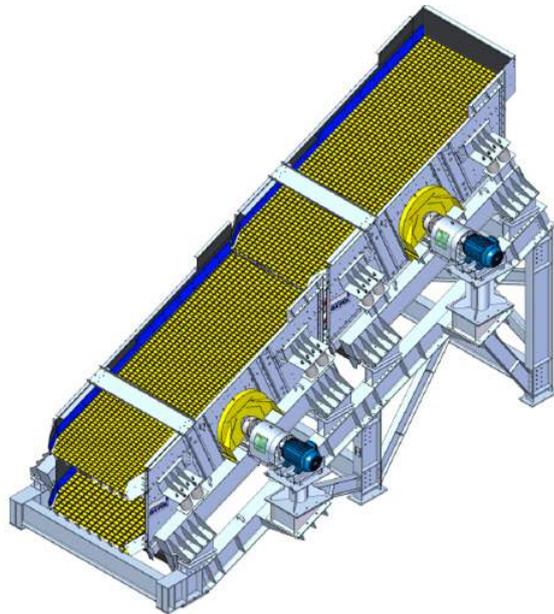


Figura 3.25: Peneira vibratória modular excêntrica.  
 Fonte: Haver and Boecker - Projeto interno Vale.

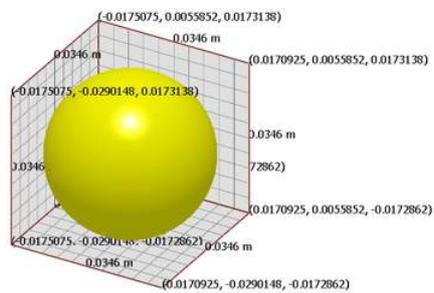


Figura 3.26: Partícula de minério e aproximação para a simulação.  
 Fonte: o autor.

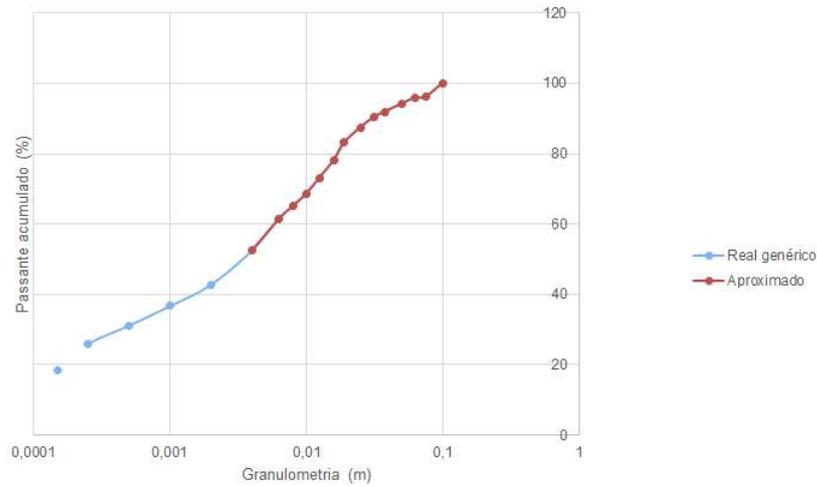


Figura 3.27: Distribuição granulométrica real genérica e distribuição granulométrica usada como parâmetro de entrada da simulação.

Fonte: o autor.

Os demais parâmetros de entrada do modelo são apresentados na Tabela 3.6. Os valores das propriedades foram sugeridos pelo próprio software de acordo com o minério de ferro Hematita que apresenta massa específica igual a  $4400 \text{ kg/m}^3$ , coeficiente de Poisson igual a 0,25. Em relação às interações entre partículas e a estrutura da peneira foram consideradas as propriedades de interação entre o minério de ferro e um aço estrutural convencional.

Tabela 3.6: Parâmetros utilizados para o modelo de Hertz-Mindlin.

Parâmetros	Minério- Minério	Minério- Estrutura
Coefficiente de atrito estático	0,2	0,5
Coefficiente de atrito de rolamento	0,15	0,01
Coefficiente de restituição (normal e tangencial)	0,15	0,5

Fonte: o autor.

As equações governantes do modelo seguem àquelas apresentadas na metodologia do caso do alimentador de sapatas (seção 3.3.4), com adição da força de coesão normal,  $F_{n,coesao}$ , (Eq. 3.15) somada a força de contato normal, sendo  $k$  o coeficiente de coesão e  $A_{ij}$  a área de contato entre as partículas  $i$  e  $j$  (RAMÍREZ-ARAGÓN *et al.*, 2018). Para representar a umidade do minério, o parâmetro a ser variado é o coeficiente de coesão. Para avaliação do

desempenho, foram criados, portanto, quatro cenários, sendo o primeiro o cenário seco, para o qual entende-se que o material tem umidade natural baixa (sem coeficientes de coesão) e os demais cenários variando o coeficiente de coesão entre as interações minério-minério e minério-estrutura (Tabela 3.7). Os coeficientes de coesão foram escolhidos por testes prévios em uma simulação simplificada onde foram inseridas as partículas em queda que se chocavam com uma placa plana vibrante, a observação visual permitiu chegar aos valores descritos além da referência do trabalho de Roessler e Katterfeld (2019), que avaliaram o comportamento da água em areia, via experimentos laboratoriais e via simulação em DEM para correlacionar a umidade no material com as forças coesivas e propor uma calibração.

$$F_{n,coesao} = kA_{ij} \quad (3.15)$$

Tabela 3.7: Coeficiente de coesão para cada cenário, unidades em  $J/m^3$ .

Cenários	Minério- Minério	Minério- Estrutura
Cenário 1	0,00	0,00
Cenário 2	150.000,00	50.000,00
Cenário 3	150.000,00	150.000,00
Cenário 4	450.000,00	300.000,00

Fonte: o autor.

#### 3.4.4. Resultados e discussões

Após simulação dos 30 segundos do processo de peneiramento, os resultados dos quatro cenários são apresentados pela Figura 3.28 nas quais pode ser observada uma redução progressiva da quantidade de material ao longo da peneira, partindo do cenário 1 para o cenário 4. Tal fato ocorre devido a menor capacidade das partículas escoarem livremente e menor mobilidade dessas partículas, ou seja, quanto maior a umidade, maior o tempo de permanência da partícula na peneira. A redução da quantidade de material ao longo da peneira é relacionado com a aglomeração entre as partículas e entre partícula e estrutura; a medida que as partículas se aglomeram, mais difícil fica o escoamento. É perceptível a aglomeração pela diminuição do leito de material e pela saída de material na moega. O comportamento aglomerante das partículas a

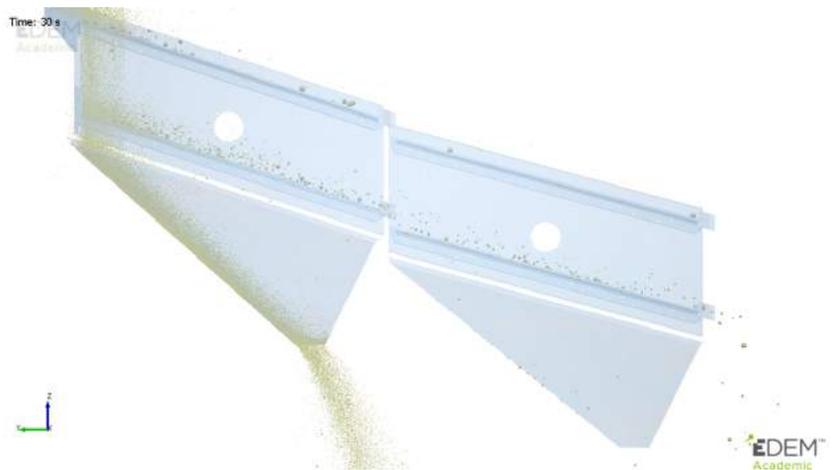
medida em que se aumenta o coeficiente de coesão pode ser visto na Figura 3.29, que trata-se de um zoom de uma região do deck superior da peneira, onde também é possível notar, principalmente pelo Cenário 3 e Cenário 4, que quanto maior o coeficiente de coesão, maiores são as chances de ocorrer entupimento na tela.



a) Cenário 1



b) Cenário 2



c) Cenário 3



d) Cenário 4

Figura 3.28: Peneira vibratória - cenários após 30 s.

Fonte: o autor.

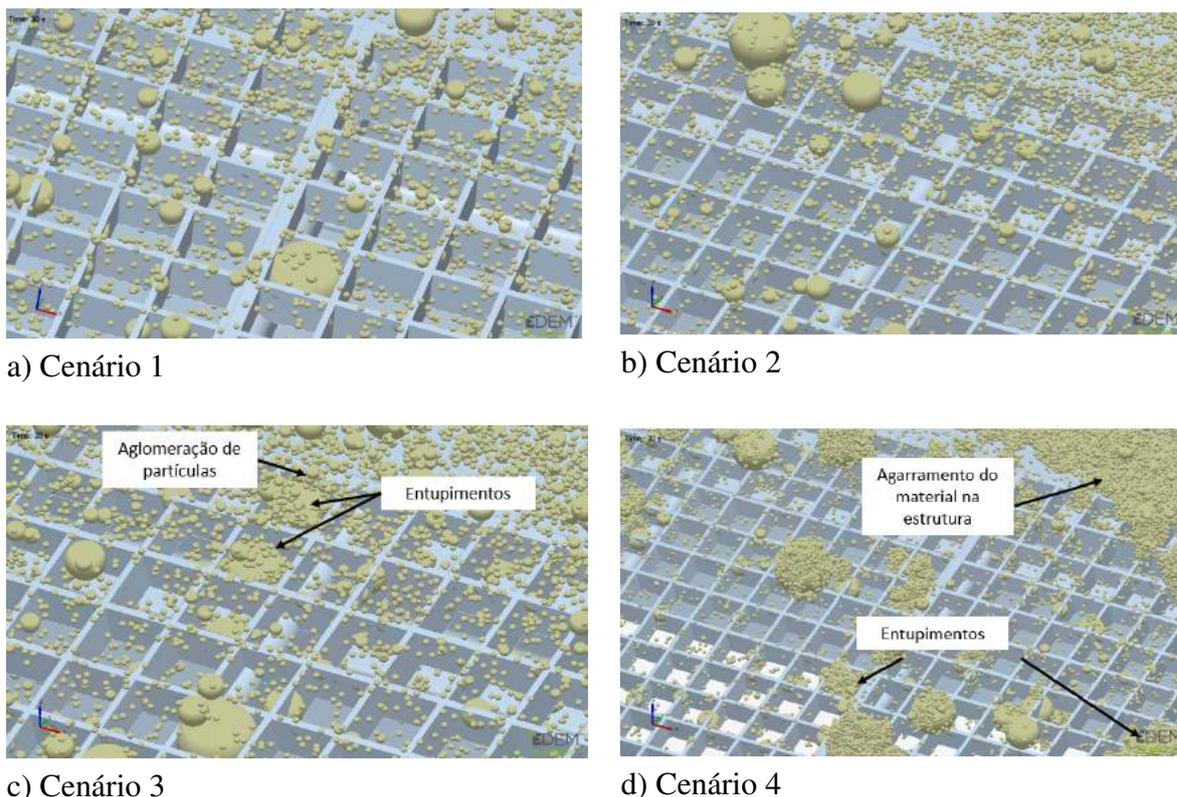


Figura 3.29: Vista detalhada da peneira e partículas.

Fonte: o autor.

Dado os 30 segundos de processo simulado, a redução da quantidade de material na peneira conforme afirmado anteriormente pode ser confirmado pelas Figuras 3.30 a 3.33 onde é contabilizado o número de partículas na faixa central da peneira (destaque na cor laranja). Como padrão de peneiramento, percebe-se um número de partículas passantes maior na entrada do equipamento e este número decai a medida que se caminha para a outra extremidade. Para uma situação de partículas com umidade elevada, as partículas se aglomeram em contato entre si e com o equipamento já na entrada do mesmo, o que piora o escoamento em comparação com o material seco. Para o tempo de simulação pré-determinado, as imagens do cenário 4 mostram que o material não conseguiu preencher completamente a peneira, ou seja, necessitaria de mais tempo para que o material corresse por toda a área de peneiramento.

Por meio das simulações também é possível fazer uma análise da quantidade de material passante (*underflow*) e retido (*overflow*), assim as curvas granulométricas obtidas para todos os cenários são apresentadas nas Figuras 3.34 a 3.37. Para os cenários 1, 2 e 3, o comportamento do passante acumulado em relação ao diâmetro das partículas é similar: no *underflow* encontram-se as partículas menores, como é esperado, e acompanha a curva real com um leve descolamento para baixo. No caso do cenário 4, a curva do *underflow* é levemente deslocada para cima e isto pode ser explicado pelo fato das partículas permanecerem um tempo maior na peneira (tempo de residência), principalmente na parte superior do equipamento, uma vez que apresentam maiores

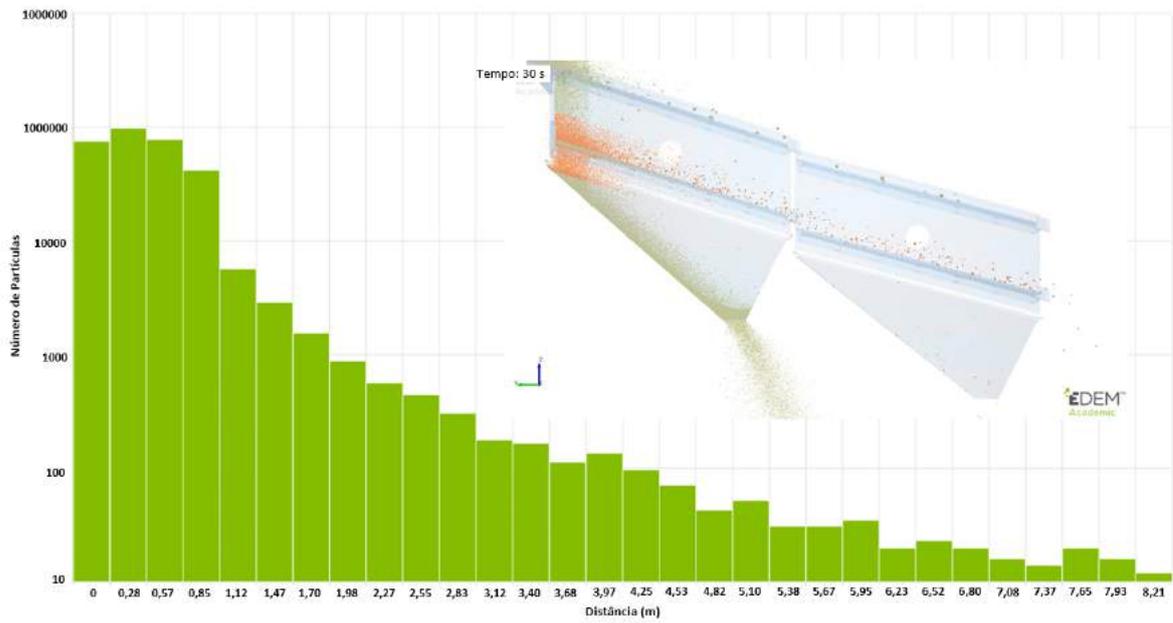


Figura 3.30: Número de partículas ao longo da peneira - Cenário 1.  
 Fonte: o autor.

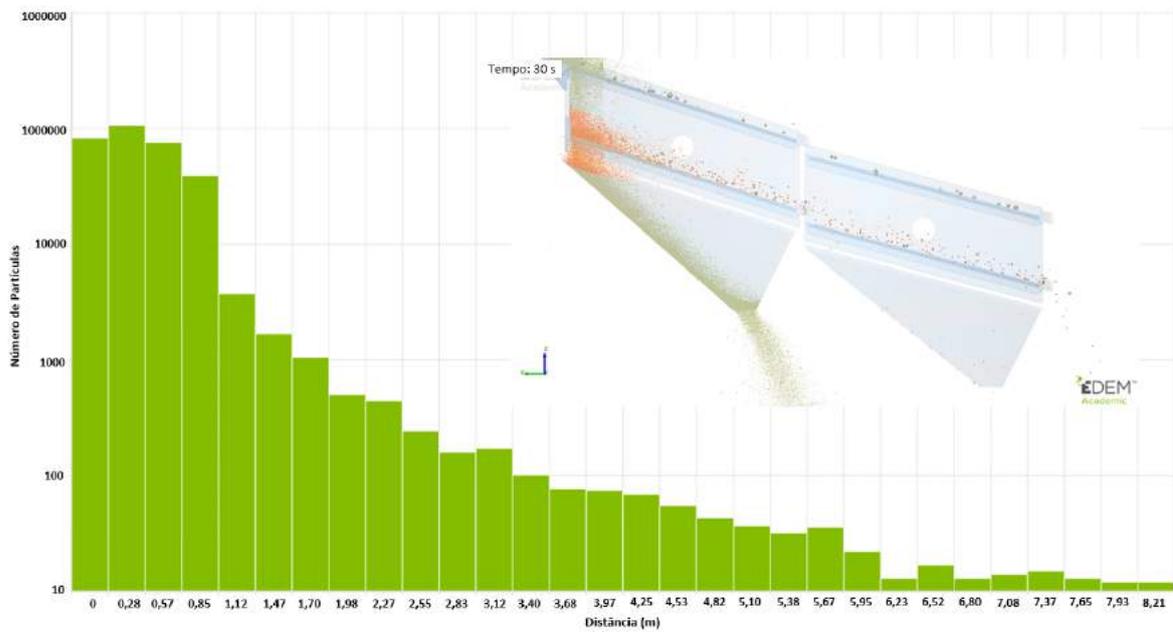


Figura 3.31: Número de partículas ao longo da peneira - Cenário 2.  
 Fonte: o autor.

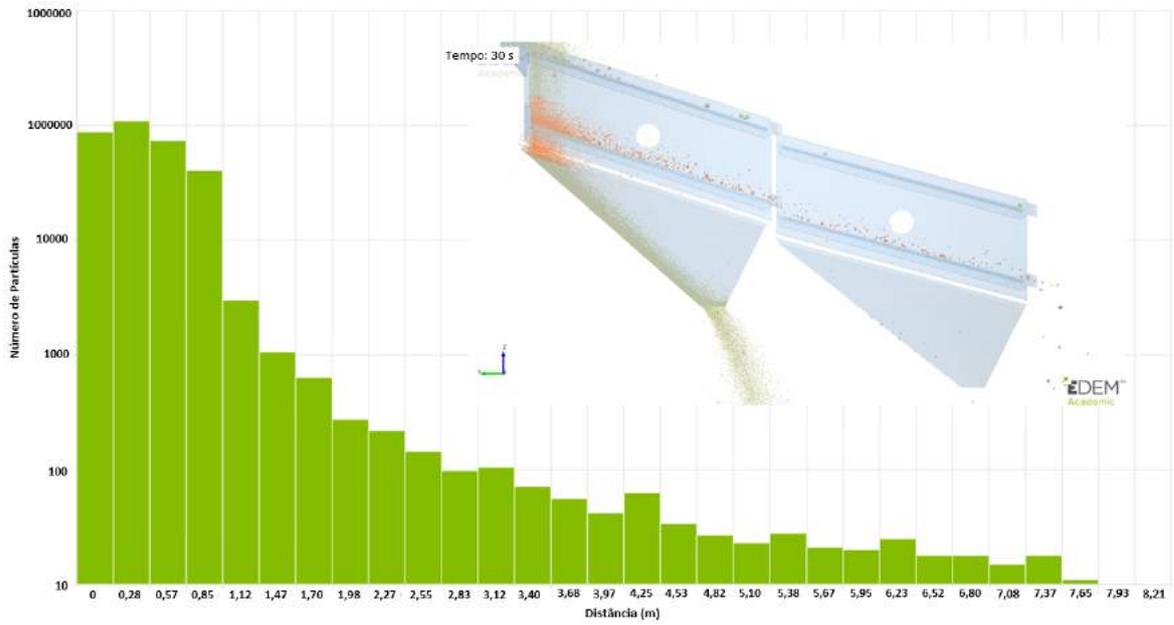


Figura 3.32: Número de partículas ao longo da peneira - Cenário 3.  
Fonte: o autor.

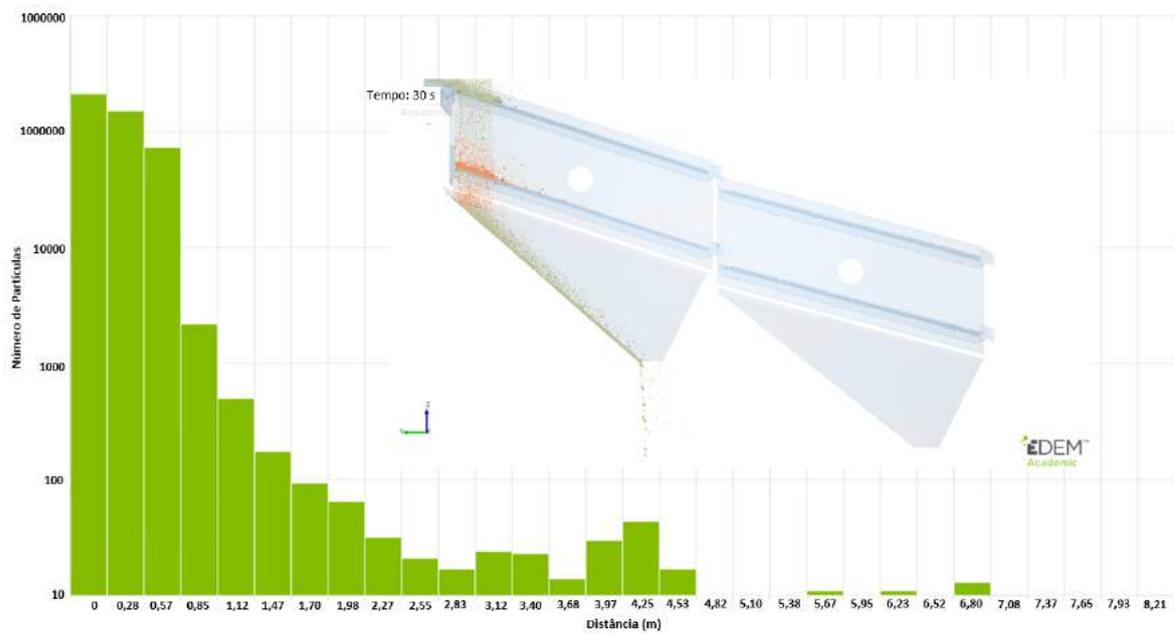
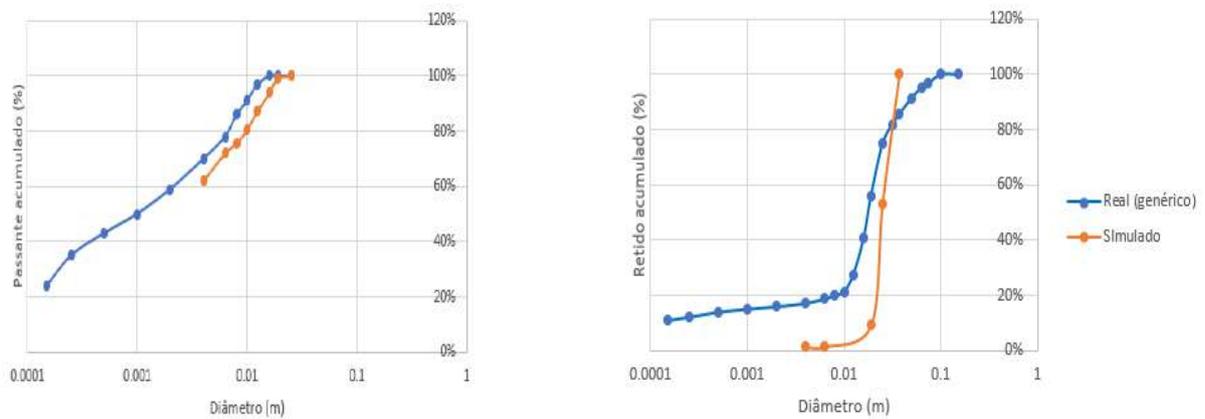


Figura 3.33: Número de partículas ao longo da peneira - Cenário 4.  
Fonte: o autor.

valores de coesão, e tal fato contribui com a maior estratificação, favorecendo a primeira faixa do comportamento coletivo.

No caso do *overflow*, as curvas obtidas não ficam exatamente próximas a curva real devido a baixa amostragem de partículas maiores que chegam ao fim da peneira no período de tempo analisado, tal observação é válida para os cenários 1 a 4, e principalmente para o cenário 4. Para contornar tal problema, propõe-se um tempo maior de simulação, no entanto, necessita-se de maior poder computacional pois quanto maior o tempo simulado mais partículas são geradas. Ressalta-se que para a realização da simulação com as condições descritas anteriormente, utilizou-se de um servidor com processador Intel Xeon de 2.30 GHz com 32 núcleos e com 64 GB de memória RAM e ainda assim, o tempo de 30 s foi considerado como máximo viável.



a) Undersize

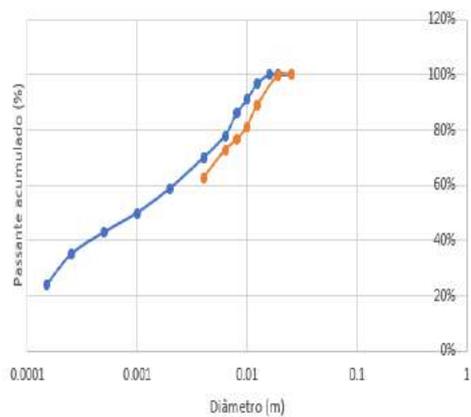
b) Oversize

Figura 3.34: Distribuição granulométrica no cenário 1.

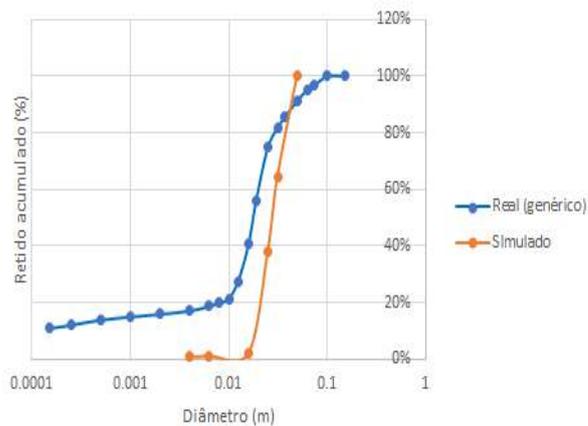
Fonte: o autor.

### 3.4.5. Conclusões

Conclui-se que a utilização do método de elementos discretos com a inserção da força de coesão entre as partículas pode ser uma alternativa para a modelagem da umidade no minério. No caso deste trabalho foram construídos quatro cenários, sendo o primeiro o material seco (umidade natural) e os demais feitos com o aumentos no coeficiente de coesão entre minério-minério e minério-estrutura. Notou-se que quanto maior o coeficiente de coesão mais dificuldade as partículas tem para escoar, ou maior o tempo de residência na peneira e ainda é possível afirmar que maiores são as chances de entupimento das telas. Portanto, o maior coeficiente de coesão correspondente a uma maior umidade, aumenta o tempo do material na peneira, aumenta o agarramento de material e entupimento o que pode implicar em diminuição da produtividade do equipamento.



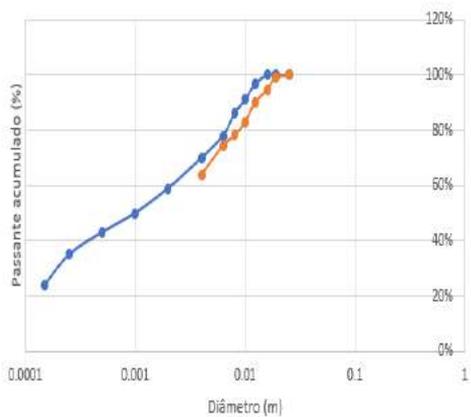
a) Undersize



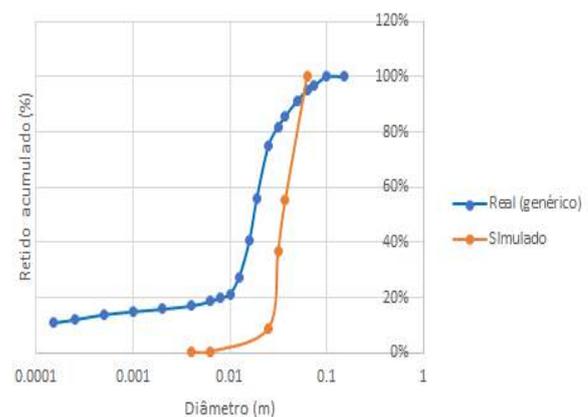
b) Oversize

Figura 3.35: Distribuição granulométrica no cenário 2.

Fonte: o autor.



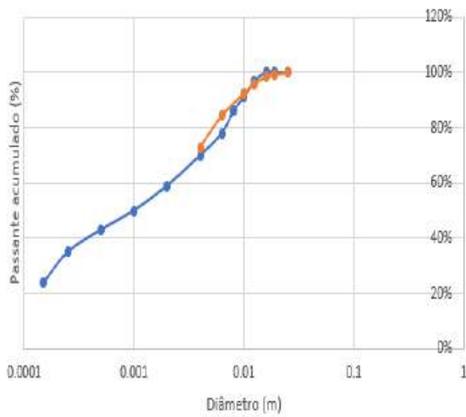
a) Undersize



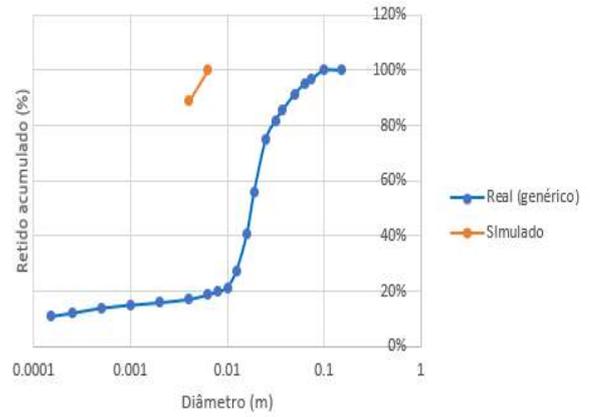
b) Oversize

Figura 3.36: Distribuição granulométrica no cenário 3.

Fonte: o autor.



a) Undersize



b) Oversize

Figura 3.37: Distribuição granulométrica no cenário 4.

Fonte: o autor.

Propõe-se para trabalhos futuros simular em maiores tempos de simulação para se chegar em regime permanente. Também propõe-se para trabalhos futuros a realização de ensaios em laboratório para correlação do coeficiente de coesão e a umidade do minério, como no trabalho de Roessler e Katterfeld (2019) e ainda testes em uma peneira real, conforme os parâmetros de entrada da simulação, para análise e validação.

# Referências Bibliográficas

- ASBJÖRNSSON, G., BENGTSSON, M., HULTHÉN, E., EVERTSSON, M. “Model of banana screen for robust performance”, **Minerals Engineering**, v. 91, pp. 66–73, 2016.
- BAIK, S., HA, D., KO, R., KWON, J. “Magnetic field analysis of high gradient magnetic separator via finite element analysis”, **Physica C: Superconductivity**, v. 480, pp. 111–117, 2012.
- BRASIL. “Anuário Mineral Brasileiro 2019: Principais substâncias metálicas. Ano base 2018”. Agência Nacional de Mineração, Brasília, DF, 2019.
- BRASIL. “Água: Fatos e Tendências”. Agência Nacional de Águas, Brasília, DF, 2009.
- CALLISTER JUNIOR, W. D., RETHWISCH, D. G. “Ciência e engenharia de materiais: uma introdução”, **Rio de Janeiro: LTC**, v. 589, pp. 249, 2002.
- CARTER, R. A. “Conveyors: Getting It Right the First Time”, **Engineering and Mining Journal**, v. 220, n. 9, pp. 28–33, 2019.
- CHAVES, A. “Teoria e prática do tratamento de minérios, Vol. 1”. 1996.
- CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios - Britagem, Peneiramento e Moagem**. Signus, 2003.
- CHEN, L., QIAN, Z., WEN, S., HUANG, S. “High-gradient magnetic separation of ultra-fine particles with rod matrix”, **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 34, n. 5, pp. 340–347, 2013.
- CLEARY, P. W. “Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods”, **Minerals Engineering**, v. 11, n. 11, pp. 1061–1080, 1998.
- CUNDALL, P. A., STRACK, O. D. “A discrete numerical model for granular assemblies”, **geotechnique**, v. 29, n. 1, pp. 47–65, 1979.

- DAVOODI, A., ASBJÖRNSSON, G., HULTHÉN, E., EVERTSSON, M. “Application of the discrete element method to study the effects of stream characteristics on screening performance”, **Minerals**, v. 9, n. 12, pp. 788, 2019.
- DE JESUS OLIVEIRA, D., GUERMANDI, L. G., BIANCHI, E. C., DINIZ, A. E., DE AGUIAR, P. R., CANARIM, R. C. “Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning”, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 12, pp. 2559–2568, 2012.
- DOMINGUES, A. F., BOSON, P. H. G., ALÍPAZ, S. “A gestão dos recursos hídricos e a mineração”. Agência Nacional de Águas, Brasília, DF, 2006.
- DONG, M., MEI, Y., LI, X., SHANG, Y., LI, S. “Experimental measurement of the normal coefficient of restitution of micro-particles impacting on plate surface in different humidity”, **Powder Technology**, v. 335, pp. 250–257, 2018.
- ESSS. “Método numérico, analítico e experimental: concorrentes ou complementares na engenharia?” Disponível em <https://www.esss.co/blog/metodo-numerico-analitico-e-experimental-concorrentes-ou-complementares-na-engenharia/>, out. 2017.
- FREITAS, A. H., MAGRINI, A. “Multi-criteria decision-making to support sustainable water management in a mining complex in Brazil”, **Journal of Cleaner Production**, v. 47, pp. 118–128, 2013.
- FUERSTENAU, M. C., HAN, K. N. **Principles of mineral processing**. SME, 2003.
- GAUDIN, A. M. **Principles of mineral dressing**. McGraw-Hill Book Company, 1939a.
- GAUDIN, A. M. **Principles of mineral dressing**. Relatório técnico, 1939b.
- GAUSTEC. “Catálogo Wet High Intensity Separator”. 2008.
- GONZAGA, L. M. **Separação magnética a úmido de minérios de ferro itabirítica**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz de Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rio de Janeiro, 2014.
- GUPTA, A., YAN, D. S. **Mineral processing design and operations: an introduction**. Elsevier, 2016.
- HENRIQUES, A. B., ANGRISANO, L. C. S., OLIVEIRA, I. “Caracterização mineralógica de hematitas do Quadrilátero Ferrífero”, **Revista Pensa Engenharia**, v. 1, n. 1, 2013.
- HERTZ, H. “On the contact of elastic solids”, **Z. Reine Angew. Mathematik**, v. 92, pp. 156–171, 1881.

- JOHANSSON, M., QUIST, J., EVERTSSON, M., HULTHÉN, E. “Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation”, **Minerals Engineering**, v. 103, pp. 93–101, 2017.
- KRETZ, D., CALLAU-MONJE, S., HITSCHLER, M., HIEN, A., RAEDLE, M., HESSER, J. “Discrete element method (DEM) simulation and validation of a screw feeder system”, **Powder Technology**, v. 287, pp. 131–138, 2016.
- LAWVER, J. E., JE, L., DM, H. “Wet magnetic separation of weakly magnetic minerals”, 1974.
- LEE, S., LEE, Y., JEONG, H. D., CHOI, H. “The effect of high pressure air jet on form accuracy in slot grinding”, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 128, n. 1-3, pp. 67–72, 2002.
- LUZ, A. B. D., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. “Tratamento de minérios”, 2010.
- MARTÍN-HERNÁNDEZ, F., FERRÉ, E. C. “Separation of paramagnetic and ferrimagnetic anisotropies: A review”, **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 112, n. B3, 2007.
- METSO. “Alimentador de sapatas”. nov. 2019.
- MINDLIN, R. D. “Compliance of elastic bodies in contact”, **J. Appl. Mech., ASME**, v. 16, pp. 259–268, 1949.
- OBERTEUFFER, J. “Magnetic separation: A review of principles, devices, and applications”, **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 10, n. 2, pp. 223–238, 1974.
- OKADA, H., MITSUHASHI, K., OHARA, T., WHITBY, E. R., WADA, H. “Computational fluid dynamics simulation of high gradient magnetic separation”, **Separation science and technology**, v. 40, n. 7, pp. 1567–1584, 2005.
- OUTOTEC. “SLon vertically pulsating high-gradient magnetic separator”. Finland, 2013.
- OWEN, P., CLEARY, P. “Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM)”, **Powder Technology**, v. 193, n. 3, pp. 274–288, 2009.
- PEGDEN, C. D., SADOWSKI, R. P., SHANNON, R. E. **Introduction to simulation using SIMAN**. McGraw-Hill, Inc., 1995.
- PESSOA JÚNIOR, O. “Modelo causal dos primórdios da ciência do magnetismo”, **Scientiae Studia**, v. 8, n. 2, pp. 195–212, 2010.

- QIAO, J., DUAN, C., JIANG, H., ZHAO, Y., CHEN, J., HUANG, L., WEN, P., WU, J. “Research on screening mechanism and parameters optimization of equal thickness screen with variable amplitude based on DEM simulation”, **Powder Technology**, v. 331, pp. 296–309, 2018.
- QUIST, J., EVERTSSON, C. M. “Cone crusher modelling and simulation using DEM”, **Minerals Engineering**, v. 85, pp. 92–105, 2016.
- RAMÍREZ-ARAGÓN, C., ORDIERES-MERÉ, J., ALBA-ELÍAS, F., GONZÁLEZ-MARCOS, A. “Comparison of cohesive models in EDEM and LIGGGHTS for simulating powder compaction”, **Materials**, v. 11, n. 11, pp. 2341, 2018.
- ROESSLER, T., KATTERFELD, A. “Dem parameter calibration of cohesive bulk materials using a simple angle of repose test”, **Particuology**, v. 45, pp. 105–115, 2019.
- SANTANA, R., SANTOS, K., CAMPOS, A., FERREIRA, L., OLIVEIRA, O., BARROZO, M. “EFEITO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE HERTZ-MINDLIN DE FORÇAS DE CONTATO ENTRE PARTÍCULAS SOBRE O ÂNGULO DE REPOUSO ESTÁTICO DA SOJA”, **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, pp. 11310–11317, 2015.
- SILVA, M. B. D. **Separação magnética de ultrafinos hematíticos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2012.
- SVOBODA, J. “The effect of magnetic field strength on the efficiency of magnetic separation”, **Minerals Engineering**, v. 7, n. 5-6, pp. 747–757, 1994.
- SVOBODA, J., FUJITA, T. “Recent developments in magnetic methods of material separation”, **Minerals Engineering**, v. 16, n. 9, pp. 785–792, 2003.
- SVOBODA, J. **Magnetic methods for the treatment of minerals**, v. 692. Elsevier Amsterdam, 1987.
- SVOBODA, J. **Magnetic techniques for the treatment of materials**. Springer Science & Business Media, 2004.
- TSUJI, Y., TANAKA, T., ISHIDA, T. “Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe”, **Powder technology**, v. 71, n. 3, pp. 239–250, 1992.
- VALADÃO, G. E. S., ARAÚJO, A. D. “Introdução ao tratamento de minérios”, **Belo Horizonte: Editora UFMG**, 2007.

- VALE. “Sobre a Vale”. Disponível em <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/Paginas/default.aspx>, abr. 2020.
- WANG, Q., GUAN, Y., REN, X., CHA, G., YANG, M. “Rapid extraction of low concentration heavy metal ions by magnetic fluids in high gradient magnetic separator”, **Separation and purification technology**, v. 82, pp. 185–189, 2011.
- WASHINO, K., CHAN, E. L., MATSUMOTO, T., HASHINO, S., TSUJI, T., TANAKA, T. “Normal viscous force of pendular liquid bridge between two relatively moving particles”, **Journal of colloid and interface science**, v. 494, pp. 255–265, 2017.
- WEERASEKARA, N., POWELL, M., CLEARY, P., TAVARES, L. M., EVERTSSON, M., MORRISON, R., QUIST, J., CARVALHO, R. “The contribution of DEM to the science of comminution”, **Powder Technology**, v. 248, pp. 3–24, 2013.
- WILLS, B. A., FINCH, J. **Wills’ mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. Butterworth-Heinemann, 2015.
- XIAO, X., TAN, Y., ZHANG, H., JIANG, S., WANG, J., DENG, R., CAO, G., WU, B. “Numerical investigation on the effect of the particle feeding order on the degree of mixing using DEM”, **Procedia Engineering**, v. 102, pp. 1850–1856, 2015.
- ZENG, W., DAHE, X. “The latest application of SLOn vertical ring and pulsating high-gradient magnetic separator”, **Minerals Engineering**, v. 16, n. 6, pp. 563–565, 2003.
- ZHENG, Q., XU, M., CHU, K., PAN, R., YU, A. “A coupled FEM/DEM model for pipe conveyor systems: Analysis of the contact forces on belt”, **Powder Technology**, v. 314, pp. 480–489, 2017a.
- ZHENG, X., WANG, Y., LU, D. “A realistic description of influence of the magnetic field strength on high gradient magnetic separation”, **Minerals Engineering**, v. 79, pp. 94–101, 2015.
- ZHENG, X., WANG, Y., LU, D. “Study on buildup of fine weakly magnetic minerals on matrices in high gradient magnetic separation”, **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, v. 53, 2017b.

# **ANEXOS**

# Anexo A: Produtos gerados

O trabalho de redução de consumo de água de lavagem de separador magnético vertical já conta com o depósito de uma patente no INPI, realizada no dia 16/11/2020, sob o número BR 10 2020 023390 4, Ref. P011338/BR, em nome da Vale S.A., cujo o título do invento é: Método e sistema para remoção de partículas de minério de ferro aderidas por histerese magnética a uma matriz magnética de um separador magnético vertical (Figura 38).

Data do Depósito: 16/11/2020

Invento: MÉTODO E SISTEMA PARA REMOÇÃO DE PARTÍCULAS DE MINÉRIO DE FERRO ADERIDAS POR HISTERESE MAGNÉTICA A UMA MATRIZ MAGNÉTICA DE UM SEPARADOR MAGNÉTICO VERTICAL .

Inventores: Leonardo Carvalho O. de Souza, Neymayer Pereira Lima, Thiago Antonio M. Euzébio, Thomás Vargas B. Pinto, Klaydison Carlaile Silva.

**INPI** INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

16/11/2020 870200144824  
17 45

29409161919901131

**Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT**

Número do Processo: BR 10 2020 023390 4

**Dados do Pedido**

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): MÉTODO E SISTEMA PARA REMOÇÃO DE PARTÍCULAS DE MINÉRIO DE FERRO ADERIDAS POR HISTERESE MAGNÉTICA A UMA MATRIZ MAGNÉTICA DE UM SEPARADOR MAGNÉTICO VERTICAL

**Resumo:** A presente invenção provê um método e um sistema para remoção de partículas de minério de ferro aderidas por histerese magnética a uma matriz magnética de um separador magnético vertical que compreende: um anel de separação (10) compreendendo uma matriz magnética; uma entrada (1) de alimentação de minério; um recipiente (2) de acumulação de minério posicionado na porção inferior da matriz magnética compreendendo uma saída (3) de material com baixa suscetibilidade magnética; um dispositivo gerador de campo magnético adaptado para gerar um campo magnético na região do recipiente (2) de acumulação; pelo menos uma bandeja coletora (7, 8) posicionada internamente à matriz magnética e adaptada para coletar material com maior suscetibilidade magnética despreendido da matriz magnética; e um recipiente coletor (9) adaptado para receber o material com maior suscetibilidade magnética da pelo menos uma bandeja coletora (7, 8), o sistema compreendendo:  
um desmagnetizador (4) posicionado em uma posição superior a uma primeira bandeja coletora (7) da pelo menos uma bandeja coletora (7, 8);  
um dispositivo mecânico de limpeza (5) da matriz magnética posicionado em uma posição subsequente ao desmagnetizador (4), e  
pelo menos um dispositivo gerador de jatos de ar comprimido (6) posicionado em uma posição subsequente ao dispositivo mecânico

Figura 38: Comprovante de depósito da patente

O trabalho do caso do alimentador de sapatas foi apresentado no XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2020) (Figura 39) sendo selecionado para submissão em uma edição

especial do Journal of Control, Automation and Electrical Systems – JCAE, ISSN: 2195-3880 (print version) e ISSN: 2195-3899 (electronic version) (Figura 40).



Figura 39: Certificado de Apresentação no CBA



<https://www.ufsm.br/cba2020>



Rio de Janeiro/Santa Maria, 04 de fevereiro de 2021.

Caro(s) Autor(es),

Temos o prazer de informar que o seu artigo foi selecionado para submissão de uma versão estendida e em inglês para a edição especial do Journal of Control, Automation and Electrical Systems – JCAE, ISSN: 2195-3880 (print version) e ISSN: 2195-3899 (electronic version).

As informações sobre o periódico e sistema de submissão podem ser acessadas nos seguintes endereços: <https://www.springer.com/journal/40313> e <https://www.editorialmanager.com/jcae/default.aspx>.

128170	Análise de desempenho de um sistema Silo-Comportador para regular a vazão de minério por simulação DEM	Leonardo Carvalho Oliveira de Souza, Olemar Tibães Lopes Júnior, João Lucas Lucas Barros, Thiago Euzébio	Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale
--------	--	--	---

Figura 40: Convite para submissão no Journal of Control, Automation and Electrical Systems

## Anexo B: Patente depositada

“MÉTODO E SISTEMA PARA REMOÇÃO DE PARTÍCULAS DE MINÉRIO DE FERRO ADERIDAS POR HISTERESE MAGNÉTICA A UMA MATRIZ MAGNÉTICA DE UM SEPARADOR MAGNÉTICO VERTICAL”

### CAMPO DA INVENÇÃO

[0001] A presente invenção está relacionada a processos de separação magnética de minério de ferro. Mais especificamente, a presente invenção está relacionada a um processo de separação magnética de minério de ferro que utiliza separadores magnéticos de alto gradiente pulsante vertical (VPHGMS) visando à redução do consumo de água demandada para tal.

### FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

[0002] Como conhecido no atual estado da técnica, o processo de separação magnética de minério de ferro ocorre em equipamentos chamados separadores magnéticos. Ele se baseia na diferença de comportamento das partículas minerais quando submetidas a um campo magnético.

[0003] O material a ser separado compreende uma mistura de partículas que podem ser divididas basicamente em cinco categorias com relação à sua suscetibilidade de serem magnetizadas: diamagnéticas; paramagnéticas; ferrimagnéticas; antiferromagnéticas; e ferromagnéticas.

[0004] As partículas diamagnéticas são fracamente magnetizadas e se alinham no sentido contrário ao campo magnético a que estão inseridas. Na prática, o magnetismo dessas partículas pode ser considerado zero.

[0005] As partículas paramagnéticas, assim como as ferrimagnéticas e antiferromagnéticas, são levemente magnetizadas e se alinham no mesmo sentido do campo magnético o que já permite trabalhos com separadores magnéticos.

[0006] Já as partículas ferromagnéticas são fortemente magnetizadas e se alinham no mesmo sentido do campo magnético. Por exemplo, em uma polpa de minério de ferro, a hematita (mineral ferrífero constituinte), é susceptível ao campo magnético por ser antiferromagnética, e o quartzo (principal mineral de ganga, fonte de SiO<sub>2</sub>) é pouco susceptível ao campo por ser diamagnético.

[0007] O separador magnético convencional é composto por um anel rotacional, ou carrossel, que pode ser posicionado na vertical ou na horizontal. Especificamente para um separador vertical, o anel contém matrizes, peças de aço, posicionadas em toda sua extensão, e nelas

as partículas minerais se prendem após serem magnetizadas por um campo magnético criado por ímãs induzidos, magnetizando as partículas de interesse (minério) na região de influência do campo magnético.

[0008] Entretanto, mesmo após as matrizes deixarem a região de influência do campo magnético, o minério se mantém preso às matrizes devido à força de histerese magnética. Isto cria uma resistência à liberação do material das matrizes, o que reduz a eficiência da separação mineral. Como é de conhecimento de técnicos no assunto, a histerese magnética ocorre quando um material é submetido a um campo magnético e se magnetiza, mas ao retirar esse campo, o material não é desmagnetizado completamente e nem de forma instantânea.

[0009] No estado da técnica, o despreendimento do material magnético preso às matrizes devido a histerese magnética, é realizado por meio de injeção de jatos de água. Como esse processo (utilização de jatos de água) é executado durante todo o processo de separação, o consumo de água é muito elevado e contribui significativamente à necessidade de processos posteriores para desaguamento dos produtos obtidos (concentrado magnético e rejeito não magnético), acarretando em altos custos de produção além, é claro, de grande impacto ambiental.

[0010] Uma série de documentos do estado da técnica fazem referência a separadores magnéticos, de diferentes configurações. De acordo com Zeng e Dahe (2003), em seu trabalho intitulado “The latest application of SLon vertical ring and pulsating high-gradient magnetic separator”, os primeiros separadores magnéticos de alto gradiente pulsante vertical (VPHGMS) foram desenvolvidos em 1988.

[0011] Estes equipamentos possuem um mecanismo combinado de campo magnético, fluido pulsante e gravidade para que, de forma contínua, beneficie materiais finos fracamente magnéticos. Eles apresentam como benefício um alto índice de recuperação mineral.

[0012] Desde então, esforços vêm sendo realizados buscando melhorias nestes equipamentos. O documento chinês CN2306837Y apresenta melhorias para um separador magnético vertical incluindo um desmagnetizador. A presença do desmagnetizador visa evitar a aglomeração de partículas nas matrizes e diminuir o entupimento. No entanto, este desmagnetizador localiza-se após a etapa de lavagem do minério, ou seja, a necessidade do uso de água (particularmente jatos de água) ainda se faz necessária para a separação do material magnético preso às matrizes devido a histerese magnética.

[0013] Também é possível identificar algumas melhorias para VPHGMS propostos em documentos patentários depositados no Brasil, como os documentos BR102016022548-5 e BR102015031762-0. Tais documentos propõem diferentes geometrias para as matrizes magnéticas, que acarretam em aumento do desempenho, aumento da quantidade e variedade de partículas magnéticas recuperadas, incluindo partículas de menor granulometria e susceptibilidade magnética. Apesar de essas matrizes magnéticas propostas permitirem uma redução no consumo de água no processo de separação, seu consumo ainda não é completamente evitado por tal tecnologia.

[0014] O documento CN103785528B apresenta um separador magnético rotativo por

tambor permanentemente magnético, desenvolvido para aprimorar o teor de minério concentrado e reduzir o rejeito. Para este tipo de equipamento, a água é utilizada no enxágue do tambor magnético.

[0015] Um equipamento semelhante é proposto no documento CN109847926, o qual propõe um método de separação magnético a seco. Tal tecnologia visa promover melhorias para evitar contaminação e aumentar a pureza do produto. O equipamento descrito trabalha com sopradores de ar perpendiculares ao eixo de rotação do rolo. O funcionamento deste equipamento apresenta uma série de diferenças com relação a um separador magnético vertical de alto gradiente, como a presença de ímãs permanentes, intensidade do campo, ausência de matrizes e a forma de separação.

[0016] Por fim, o documento CN104069943A propõe uma técnica de separação mineral a seco. O método, no entanto, não se aplica a um VPHGMS e também não utiliza injeção de ar comprimido. A separação mineral ocorre em correias transportadoras que carregam e descarregam o material com base em suas propriedades magnéticas.

[0017] Como resta claro a partir dos documentos apresentados, o atual estado da técnica carece de um separador magnético do tipo VPHGMS que não faça uso de água para realizar a separação de material magnético preso às matrizes do separador devido a histerese magnética. Dessa forma, nenhum dos trabalhos citados desenvolveu um método de substituição do sistema de lavagem por água por um processo que exclua completamente o uso de água em um VPHGMS, para desprender partículas magnetizadas ainda retidas no carrossel devido à histerese magnética.

[0018] Como será melhor detalhado a seguir, a presente invenção visa a solução dos problemas do estado da técnica acima descritos de forma prática e eficiente.

#### SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[0019] A presente invenção tem por objetivo prover um sistema a ser acoplado em um separador magnético de alto gradiente pulsante vertical (VPHGMS) para propiciar a remoção das partículas magnetizadas aderidas às matrizes devido à histerese magnética, proporcionando melhor eficiência de separação, redução do consumo de água na planta como um todo e redução dos custos de processos de desaguamento dos produtos em processos subsequentes sem afetar a capacidade dos equipamentos existentes.

[0020] De forma a alcançar os objetivos acima descritos, a presente invenção provê um método e um sistema para remoção de partículas de minério de ferro aderidas por histerese magnética a uma matriz magnética de um separador magnético vertical, o separador magnético vertical compreendendo: um anel de separação compreendendo uma matriz magnética; uma entrada de alimentação de minério; um recipiente de acumulação de minério posicionado na porção inferior da matriz magnética compreendendo uma saída de material com baixa suscetibilidade magnética; um dispositivo gerador de campo magnético adaptado para gerar um campo magnético na região do recipiente de acumulação; pelo menos uma bandeja coletora posicionada internamente à matriz magnética e adaptada para coletar material com maior sus-

cetibilidade magnética desprendido da matriz magnética; e um recipiente coletor adaptado para receber o material com maior suscetibilidade magnética da pelo menos uma bandeja coletora, o sistema compreendendo:

um desmagnetizador posicionado em uma posição superior a uma primeira bandeja coletora da pelo menos uma bandeja coletora;

um dispositivo mecânico de limpeza da matriz magnética posicionado em uma posição subsequente ao desmagnetizador; e

pelo menos um dispositivo gerador de jatos de ar comprimido posicionado em uma posição subsequente ao dispositivo mecânico de limpeza da matriz magnética.

#### BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

[0021] A descrição apresentada adiante faz referência às figuras anexas e seus respectivos números de referência.

[0022] A figura 1 ilustra uma vista esquemática de uma configuração opcional do sistema para remoção de partículas de minério de ferro aderidas por histerese magnética a uma matriz de um separador magnético vertical, de acordo com a presente invenção.

[0023] A figura 2a ilustra uma vista esquemática de um desmagnetizador opcionalmente adotado pela presente invenção.

[0024] A figura 2b ilustra uma vista esquemática de um dispositivo mecânico de limpeza da matriz magnética opcionalmente adotado pela presente invenção.

[0025] A figura 2c ilustra uma vista esquemática de um dispositivo gerador de jatos de ar comprimido opcionalmente adotado pela presente invenção. [0026] A figura 3 ilustra um fluxograma representado o método para remoção de partículas de minério de ferro, aderidas por histerese magnética a uma matriz de um separador magnético vertical.

#### DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

[0027] Preliminarmente, ressalta-se que a descrição que se segue partirá de uma concretização preferencial da invenção. Como ficará evidente para qualquer técnico no assunto, no entanto, a invenção não está limitada a essa concretização particular.

[0028] O sistema e o método para remoção de partículas de minério de ferro, aderidas por histerese magnética a uma matriz de um separador magnético vertical propostos neste documento são capazes de modificar a operação de um separador magnético vertical (opcionalmente um VPHGMS) para que ele passe a realizar a remoção das partículas magnetizadas presas à matriz magnética sem uso de água. Dessa forma, a invenção reduz significativamente o consumo de água neste processo e, conseqüentemente, os custos financeiros e ambientais inerentes ao seu uso.

[0029] No presente relatório, o separador magnético vertical adotado para fins descritivos é opcionalmente um VPHGMS. Desta forma, esse tipo de separador magnético vertical será utilizado durante a maior parte da descrição que se segue. Entretanto, deve-se entender que sempre que for usado o termo VPHGMS, deve-se entender que todas as características da invenção poderão estar sendo aplicadas a um separador magnético vertical com diferentes configurações.

Em outras palavras, a aplicação da invenção não deve ser limitada a um separador VPHGMS, mas a qualquer separador magnético vertical.

[0030] Atualmente, os equipamentos de separação magnética VPHGMS operam a úmido. Como sabido, a polpa de minério é despejada em um recipiente que está imerso em um campo magnético, o qual magnetiza as partículas mais suscetíveis. O carrossel vertical (anel de separação), característico deste equipamento, apresenta um movimento rotacional que passa pelo recipiente magnético quando está em seu ponto mais baixo e aprisiona (por forças magnéticas) as partículas em matrizes construídas por filamentos de aço e posicionadas no contorno do carrossel. No recipiente também há um mecanismo de pulsação que promove a movimentação constante das partículas na polpa para maximizar seu aprisionamento nas matrizes, principalmente as mais finas. As partículas menos suscetíveis não são magnetizadas, se separam das demais, e se tornam rejeito. À medida que o carrossel rotaciona e as matrizes se movimentam para fora da região de influência do campo magnético, as partículas de interesse (partículas magnetizadas) ainda se mantêm presas aos filamentos de aço devido à histerese magnética. Próximo ao topo, um fluxo de água é aplicado nas matrizes magnéticas, para separar essas partículas ainda presas.

[0031] A figura 1 ilustra uma vista esquemática de uma configuração opcional do sistema para remoção de partículas de minério de ferro aderidas por histerese magnética a uma matriz magnética de um separador magnético vertical, de acordo com a presente invenção.

[0032] De um modo mais amplo, a presente invenção provê um sistema para remoção de partículas de minério de ferro, aderidas por histerese magnética a uma matriz magnética de um separador magnético vertical, o separador magnético vertical compreendendo: um anel de separação 10 compreendendo uma matriz magnética; uma entrada 1 de alimentação de minério; um recipiente 2 de acumulação de minério posicionado na porção inferior do anel de separação 10; um dispositivo gerador de campo magnético adaptado para gerar um campo magnético na região do recipiente 2 de acumulação; pelo menos uma bandeja coletora 7, 8 posicionada internamente à matriz magnética e adaptada para coletar material com maior suscetibilidade magnética desprendido da matriz magnética; e um recipiente coletor 9 adaptado para receber o material com maior suscetibilidade magnética da pelo menos uma bandeja coletora 7, 8.

[0033] Particularmente, o sistema compreende: um desmagnetizador 4 posicionado em uma posição superior a uma primeira bandeja coletora 7 da pelo menos uma bandeja coletora 7, 8; um dispositivo mecânico de limpeza 5 da matriz magnética posicionado em uma posição subsequente ao desmagnetizador 4; e pelo menos um dispositivo gerador de jatos de ar comprimido 6 posicionado em uma posição subsequente ao dispositivo mecânico de limpeza 5 da matriz magnética.

[0034] É importante pontuar que a sequência de posicionamento dos elementos do sistema, com indicado anteriormente, depende, obviamente, do sentido de giro do anel de separação 10. No exemplo ilustrado, o anel de separação 10 é girado no sentido anti-horário. Deste modo, uma partícula aderida à matriz magnética deste anel irá passar primeiro pela região

impactada pelo desmagnetizador 4, subsequentemente pelo dispositivo mecânico de limpeza 5, e por fim pelo dispositivo gerador de jatos de ar comprimido 6.

[0035] Ressalta-se que essa sequência dos elementos pode ser alterada em configurações particulares. Em configurações distintas, mais de um desses elementos podem ser adotados, e até usados de forma intercalada.

[0036] Opcionalmente, conforme ilustrado na figura 1, o separado magnético em que o sistema da invenção é aplicado é um separador magnético do tipo VPHGMS. Entretanto, deve-se entender que o sistema pode ser aplicado a quaisquer tipos de separadores magnéticos verticais conhecidos, como ficará evidente para qualquer técnico no assunto.

[0037] Em seguida, será explicado o funcionamento da invenção. O minério, composto tanto por partículas com maior suscetibilidade magnética quanto por partículas com suscetibilidade magnética baixa ou nula, é despejado, através da entrada 1 de alimentação de minério, em um recipiente 2 de acumulação de minério. Nessa região, é posicionado um dispositivo gerador de campo magnético adaptado para gerar um campo magnético na região do recipiente 2 de acumulação.

[0038] As partículas do minério que tiverem uma maior suscetibilidade serão magnetizadas e ficarão presas às matrizes magnéticas do anel de separação 10. Já as partículas com baixa suscetibilidade, não serão magnetizadas e seguirão o fluxo para outro processo através de uma saída 3 de material com baixa suscetibilidade magnética.

[0039] O anel de separação 10, como já informado, se movimenta no sentido anti-horário e carrega as partículas magnetizadas, aderidas por forças magnéticas às matrizes magnéticas, ao longo da sua trajetória. Entretanto, mesmo fora da região de influência do campo magnético, algumas partículas se mantêm presas às matrizes magnéticas apenas pela histerese magnética.

[0040] Para facilitar o desprendimento dessas partículas, é provido um desmagnetizador 4 posicionado em uma posição superior a uma primeira bandeja coletora 7 da pelo menos uma bandeja coletora 7, 8. A figura 2a ilustra uma vista esquemática de um desmagnetizador 4 opcionalmente adotado pela presente invenção. O desmagnetizador 4 proposto cria uma região de campo magnético alternado por meio da passagem de corrente alternada nas bobinas. Este campo magnético alternado desmagnetiza as partículas presas às matrizes magnéticas fazendo com que algumas partículas se desprendam das matrizes e sejam coletadas por uma primeira bandeja coletora 7 da pelo menos uma bandeja coletora 7, 8, que as direciona para o recipiente coletor 9.

[0041] Como pode ser observado, na configuração preferencial ilustrada na figura 1, podem ser opcionalmente adotadas duas bandejas coletoras, as quais: uma primeira bandeja coletora 7 posicionada abaixo do desmagnetizador 4; e uma segunda bandeja coletora 8 posicionada abaixo do dispositivo mecânico de limpeza 5 do dispositivo mecânico de limpeza 5 da matriz magnética.

[0042] O dispositivo mecânico de limpeza 5 promove a limpeza das matrizes magnéticas ao introduzir filamentos flexíveis no interior das mesmas. Assim, o dispositivo mecânico per-

manece fixo, junto à estrutura fixa do separador magnético e os filamentos varrem todas as matrizes magnéticas do anel de separação 10 devido ao movimento rotacional ininterrupto do anel de separação 10 de modo que o minério é direcionado para a segunda bandeja coletora 8, minério este que mesmo após ter sido submetido à desmagnetização, ainda está aglomerado nas matrizes magnéticas.

[0043] A figura 2b ilustra uma vista esquemática de um dispositivo mecânico de limpeza 5 da matriz magnética opcionalmente adotado pela presente invenção. Os filamentos do dispositivo mecânico de limpeza 5 penetram nas matrizes magnéticas e separam parte do minério previamente ao dispositivo gerador de jatos de ar comprimido 6. Como o anel de separação 10 apresenta movimento rotativo ininterrupto, os filamentos flexíveis penetram em todas as matrizes que passam pelo ponto onde o dispositivo mecânico está instalado. Preferencialmente, na parte inferior do dispositivo mecânico de limpeza 5, os filamentos são curtos, e se alongam à medida que se aproximam da parte superior do dispositivo. Dessa forma, a eficiência de limpeza é melhorada, uma vez que os filamentos acompanham o arco formado pelo anel de separação 10. Cada filamento flexível é construído em material com propriedades magnéticas nulas, assim não há atração das partículas de minério devido à histerese magnética.

[0044] A seguir, e também acima da segunda bandeja coletora 8, é provido pelo menos um dispositivo gerador de jatos de ar comprimido 6. A figura 2c ilustra uma vista esquemática de um dispositivo gerador de jatos de ar comprimido 6 opcionalmente adotado pela presente invenção. Neste ponto, jatos de ar comprimido são aplicados no carrossel para separar as partículas que ainda se mantêm presas às matrizes. Preferencialmente, o pelo menos um dispositivo gerador de ar comprimido é posicionado frontalmente ao anel de separação, de modo angulado, em que o ar comprimido atinge a matriz magnética no sentido contrário à sua rotação ou paralelo ao anel de separação, em que o ar comprimido atinge a matriz magnética pela lateral. Assim, as partículas desprendidas nessa etapa são coletadas pela pelo menos uma bandeja coletora 7, 8 (preferencialmente a segunda bandeja coletora 8), e também são enviadas para o recipiente coletor 9 de concentrado.

[0045] O pelo menos um dispositivo gerador de jatos de ar comprimido 6 é composto por um conjunto de tubos que constantemente aplicam ar comprimido nas matrizes magnéticas do anel de separação 10 para separar (desprender das matrizes magnéticas) as partículas de minério. Como houve uma desmagnetização dessas partículas, elas são mais facilmente separadas. Dessa forma, é possível que o ar comprimido seja capaz de separar o minério de ferro da matriz.

[0046] A figura 3 ilustra um fluxograma que representa de forma ampla o método para remoção de partículas de minério de ferro aderidas por histerese magnética a uma matriz de um separador magnético vertical. Tal método, aplicado a um separador magnético como já descrito neste relatório, compreende essencialmente as etapas de: desmagnetizar partículas de minério de ferro em uma posição subsequente a uma primeira bandeja coletora 7 da pelo menos uma bandeja coletora 7, 8; raspar com um dispositivo mecânico de limpeza 5 a matriz magnética em uma posição subsequente ao desmagnetizador 4; e direcionar jatos de ar comprimido contra a

matriz magnética em uma posição subsequente ao dispositivo mecânico de limpeza 5 da matriz magnética.

[0047] O funcionamento do dispositivo começa com a aplicação de uma corrente alternada sobre um par de bobinas posicionadas em lados opostos do anel de separação 10, em uma configuração de Helmholtz, em uma região acima do ponto de despejo do material a ser separado (acima do recipiente 2 de acumulação de minério).

[0048] A passagem de corrente alternada pelas bobinas gera um campo magnético alternado na região entre elas, que engloba parte do anel de separação 10. Esse campo magnético alternado desmagnetiza as partículas de minério que estavam presas às matrizes magnéticas do anel de separação 10 devido à histerese magnética. Na sequência, o anel de separação 10 passa pelo dispositivo mecânico de limpeza 5 da matriz magnética promovendo o arraste de material aglomerado. Em uma região subsequente, jatos de ar comprimido são aplicados às matrizes magnéticas para separar, sem a utilização de água, as partículas que ainda se mantêm presas às matrizes.

[0049] Assim, de um modo mais particular, o desmagnetizador 4 pode compreender duas bobinas de fio de cobre esmaltadas, cada bobina posicionada em um lado do anel de separação 10 do separador magnético, adaptadas para produzir um campo magnético alternado devido a passagem de corrente alternada nas bobinas.

[0050] Portanto, ao se utilizar o sistema e o método propostos pela presente invenção, será criada uma região de campo magnético alternado em um ponto da trajetória do anel de separação 10 por meio de um desmagnetizador 4. Esse ponto é devidamente determinado, ele se localiza entre a região de magnetização do minério e o ponto de injeção de ar comprimido. Este campo magnético alternado irá desmagnetizar as partículas presas às matrizes magnéticas, facilitando a remoção do material de interesse aderido às matrizes magnéticas por histerese magnética. Esse mesmo sistema irá, após a desmagnetização das partículas, realizar uma limpeza mecânica nas matrizes magnéticas por meio do dispositivo mecânico de limpeza 5 e injetar ar comprimido para separar as partículas.

[0051] Portanto, ao utilizar o sistema proposto, há uma clara melhora na eficiência do processo de separação magnética mineral, além de tornar possível a eliminação do consumo de água para a separação de minério aderido às matrizes magnéticas de separadores magnéticos verticais, reduzindo os custos financeiros e ambientais.

[0052] Inúmeras variações incidindo no escopo de proteção do presente pedido são permitidas. Dessa forma, reforça-se o fato de que a presente invenção não está limitada às configurações/concretizações particulares acima descritas.

### REIVINDICAÇÕES

1. Sistema para remoção de partículas de minério de ferro aderidas por histerese magnética a uma matriz magnética de um separador magnético vertical, o separador magnético vertical compreendendo:

um anel de separação (10) compreendendo uma matriz magnética;

- uma entrada (1) de alimentação de minério;
  - um recipiente (2) de acumulação de minério posicionado na porção inferior da matriz magnética compreendendo uma saída (3) de material com baixa suscetibilidade magnética;
  - um dispositivo gerador de campo magnético adaptado para gerar um campo magnético na região do recipiente (2) de acumulação;
  - pelo menos uma bandeja coletora (7, 8) posicionada internamente à matriz magnética e adaptada para coletar material com maior suscetibilidade magnética desprendido da matriz magnética; e
  - um recipiente coletor (9) adaptado para receber o material com maior suscetibilidade magnética da pelo menos uma bandeja coletora (7, 8),
    - o sistema sendo caracterizado por compreender:
      - um desmagnetizador (4) posicionado em uma posição superior a uma primeira bandeja coletora (7) da pelo menos uma bandeja coletora (7, 8);
      - um dispositivo mecânico de limpeza (5) da matriz magnética posicionado em uma posição subsequente ao desmagnetizador (4); e
      - pelo menos um dispositivo gerador de jatos de ar comprimido (6) posicionado em uma posição subsequente ao dispositivo mecânico de limpeza (5) da matriz magnética.
2. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por ser aplicado a um separador magnético de alto gradiente pulsante vertical (VPHGMS).
  3. Sistema, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado por serem adotadas duas bandejas coletoras, as quais: uma primeira bandeja coletora (7) posicionada abaixo do desmagnetizador (4); e uma segunda bandeja coletora (8) posicionada abaixo do dispositivo mecânico de limpeza (5) do dispositivo mecânico de limpeza (5) da matriz magnética.
  4. Sistema, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, caracterizado pelo o dispositivo mecânico de limpeza (5) da matriz magnética ser fixado à estrutura fixa do separador magnético e compreender filamentos flexíveis adaptados para serem pressionados contra a matriz magnética, em que o comprimento dos filamentos flexíveis é aumentado desde sua porção mais inferior até a sua porção mais superior, e em que os filamentos flexíveis são construídos em material com propriedades magnéticas nulas.
  5. Sistema, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de o pelo menos um dispositivo gerador de ar comprimido ser posicionado frontalmente ao anel de separação, de modo angulado, em que o ar comprimido é adaptado para atingir a matriz magnética no sentido contrário à rotação do anel de separação ou paralelo ao anel de separação, em que o ar comprimido atinge a matriz magnética pela lateral (10).
  6. Sistema, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, caracterizado pelo desmagnetizador (4) compreender duas bobinas de fio de cobre esmaltadas, cada bobina posicionada em um lado do anel de separação (10) do separador magnético, em uma configuração de Helmholtz, em que as bobinas são adaptadas para produzir um campo magnético alternado devido a passagem de corrente alternada nas bobinas.

7. Método para remoção de partículas de minério de ferro, aderidas por histerese magnética a uma matriz magnética de um separador magnético vertical, o separador magnético vertical compreendendo:

um anel de separação (10) compreendendo uma matriz magnética;

uma entrada (1) de alimentação para alimentar minério em um recipiente (2) de acumulação de minério posicionado na porção inferior da matriz magnética, em que o recipiente (2) de acumulação compreende uma saída (3) de material com baixa suscetibilidade magnética;

um dispositivo gerador de campo magnético para gerar um campo magnético na região do recipiente (2) de acumulação;

pelo menos uma bandeja coletora (7, 8) posicionada internamente à matriz magnética para coletar material com maior suscetibilidade magnética desprendido da matriz magnética; e

um recipiente coletor (9) para receber o material com maior suscetibilidade magnética da pelo menos uma bandeja coletora (7, 8),

o método sendo caracterizado por compreender as etapas de:

desmagnetizar partículas de minério de ferro em uma posição superior a uma primeira bandeja coletora (7) da pelo menos uma bandeja coletora (7, 8);

raspar com um dispositivo mecânico de limpeza (5) a matriz magnética em uma posição subsequente ao desmagnetizador (4); e

direcionar jatos de ar comprimido contra a matriz magnética em uma posição subsequente ao dispositivo mecânico de limpeza (5) da matriz magnética.

8. Método, de acordo com a reivindicação 7, caracterizado por ser aplicado a um separador magnético de alto gradiente pulsante vertical (VPHGMS).

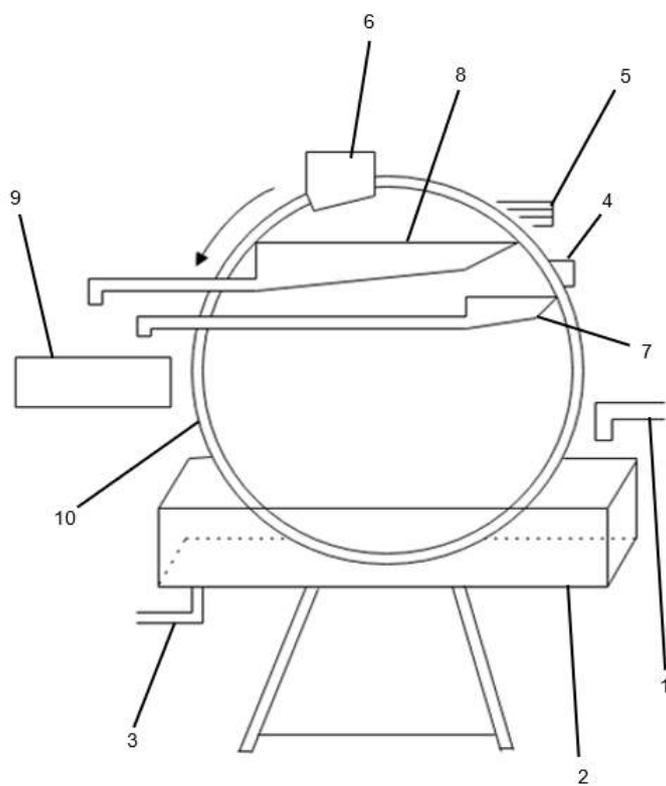


FIG. 1

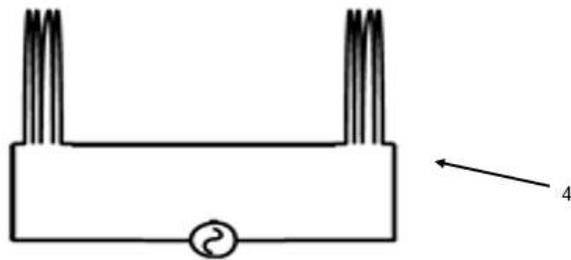


FIG. 2a

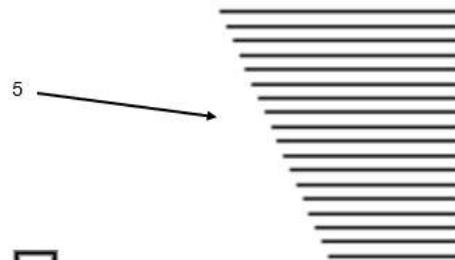


FIG. 2b

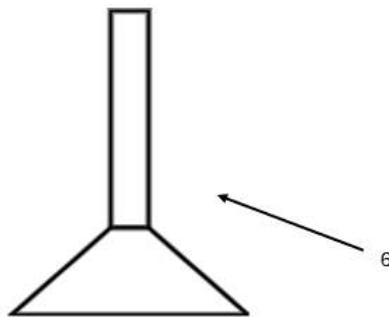


FIG. 2c

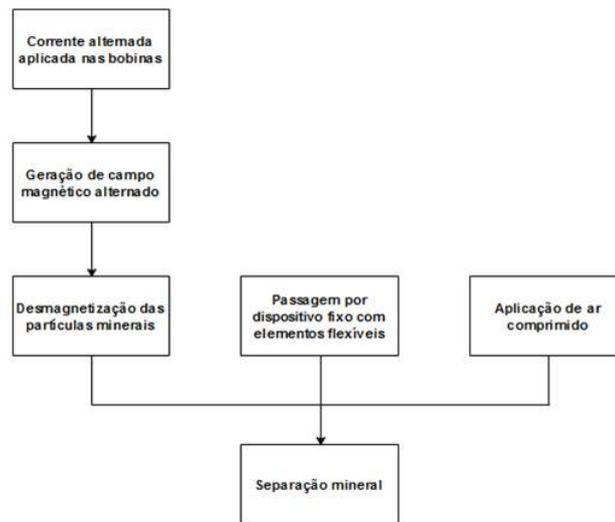


FIG. 3

## RESUMO

“MÉTODO E SISTEMA PARA REMOÇÃO DE PARTÍCULAS DE MINÉRIO DE FERRO ADERIDAS POR HISTERESE MAGNÉTICA A UMA MATRIZ MAGNÉTICA DE UM SEPARADOR MAGNÉTICO VERTICAL”

A presente invenção provê um método e um sistema para remoção de partículas de minério de ferro aderidas por histerese magnética a uma matriz magnética de um separador magnético vertical que compreende: um anel de separação (10) compreendendo uma matriz magnética; uma entrada (1) de alimentação de minério; um recipiente (2) de acumulação de minério posicionado na porção inferior da matriz magnética compreendendo uma saída (3) de material com baixa suscetibilidade magnética; um dispositivo gerador de campo magnético adaptado para gerar um campo magnético na região do recipiente (2) de acumulação; pelo menos uma bandeja coletora (7, 8) posicionada internamente à matriz magnética e adaptada para coletar material com maior suscetibilidade magnética desprendido da matriz magnética; e um recipiente coletor (9) adaptado para receber o material com maior suscetibilidade magnética da pelo menos uma bandeja coletora (7, 8), o sistema compreendendo:

um desmagnetizador (4) posicionado em uma posição superior a uma primeira bandeja coletora (7) da pelo menos uma bandeja coletora (7, 8);

um dispositivo mecânico de limpeza (5) da matriz magnética posicionado em uma posição subsequente ao desmagnetizador (4); e

pelo menos um dispositivo gerador de jatos de ar comprimido (6) posicionado em uma posição subsequente ao dispositivo mecânico de limpeza (5) da matriz magnética.