



Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM



PAULO CÉSAR GONÇALVES

**MANUSEIO DE MINÉRIO DE FERRO COESIVO SOB UMIDADE
NATURAL**

OURO PRETO

2021

PAULO CÉSAR GONÇALVES

**MANUSEIO DE MINÉRIO DE FERRO COESIVO SOB UMIDADE
NATURAL**

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

Área de Concentração: Tratamento de Minérios

Orientador: Prof. José Aurélio Medeiros da Luz

**OURO PRETO
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G635m Gonçalves, Paulo César.

Manuseio de minério de ferro coesivo sob umidade natural.
[manuscrito] / Paulo César Gonçalves. - 2021.
91 f.

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz.
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.
Área de Concentração: Engenharia Mineral.

1. Beneficiamento de minério. 2. Materiais granulados - Granéis. 3. Minérios - escoamento. I. Luz, José Aurélio Medeiros da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.794



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paulo César Gonçalves

Manuseio de minério de ferro coesivo sob umidade natural

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mineral

Aprovada em 23 de abril de 2021.

Membros da banca

Prof. Dr. - José Aurélio Medeiros da Luz — Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof. Dr. - José Margarida Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr. - Marcus Alexandre Carvalho Winitkowski da Silveira— (Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Prefeitura de Belo Horizonte)

José Aurélio Medeiros da Luz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 29/06/2021



Documento assinado eletronicamente por **Jose Aurelio Medeiros da Luz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/06/2021, às 20:22, 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, informando o código verificador **0188043** e o código CRC **5D2EDE01**.

Ao meu pai, Luiz Gordiano Gonçalves,
cuja personalidade moldou meu caráter.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força de vontade, persistência e paciência.

Aos meus pais, Sr. Luiz Gordiano Gonçalves e Sra. Maria do Carmo Gonçalves, que lutaram juntos e superaram os mais difíceis obstáculos para criar, cuidar, e dar o amor mais puro e incondicional aos seus filhos e netos.

A minha querida esposa, que em momento algum hesitou em ficar do meu lado, e sempre me deu forças para seguir em frente em busca dos meus sonhos.

Aos meus filhos, que sempre foram minha fonte de alegria e inspiração nos momentos de desânimo. Que esta conquista seja o combustível para impulsioná-los a um futuro mais próspero e menos desigual.

À minha querida e amada irmã, Maria Angélica Gonçalves, por acreditar, por estar junto e por ser a minha torcedora mais especial. Eu te amo!

À Vale S/A, representada pelos gerentes Jean Cícero Menezes de Bem e Marcelo Hugo Cardoso Batista, meus gestores ao longo do mestrado.

Ao meu orientador, Doutor Prof. José Aurélio Medeiros da Luz, pelos conselhos, direcionamentos e parceria, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Doutores Prof. José Margarida Silva e Marcus Alexandre de Carvalho Winitzkowski da Silveira, membros da banca avaliadora da defesa de dissertação, cujas observações além de nortear a condução do trabalho, abriram novas possibilidades de abordagem sobre o tema.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Ao Doutor Prof. Andre Luiz Amarante Mesquita, da Universidade Federal do Pará, pelas dicas e contribuições no início do mestrado.

Aos colegas da Vale: supervisor de manutenção Stevan Balduino da Cruz e ao técnico de manutenção Hermógenes Martins, pelo apoio na fabricação da calha de inclinação controlada; engenheiro David Junior Quites Rodrigues pelo suporte nas amostragens e avaliações de campo; supervisor de laboratório Gleysson Goncalves, pelo apoio na execução dos ensaios físicos e químicos; especialistas em desenvolvimento de processo mineral Michelle Lacerda Sales Marques, Jose Antonio Rodrigues de Oliveira e William Kaiser dos Santos, pelas valiosas contribuições técnicas ao longo do mestrado.

Às empresas Baron Revestimento Industriais Antiaderentes, Clariant, Haver & Boecker, Hefest Minerals e Martin Engineering pelo apoio e suporte nos ensaios de laboratório.

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana”

(Carl Jung)

RESUMO

O tratamento de minérios a umidade natural tem se tornado cada vez mais relevante, ora por restrições a operações a úmido que resultem em disposição de rejeitos em barragens, ora por abrir a possibilidade de pronta mistura de minérios diversos. A maior dificuldade nessas operações é o manuseio dos materiais intemperizados (em especial os goethíticos e com argilominerais), ou com maior umidade, os quais tendem a ser coesivos, exigindo cuidados adicionais no seu manuseio, principal desafio para o tratamento a umidade natural. A correta configuração de chutes de transferência, tremonhas e silos, nem sempre, é suficiente para evitar interrupções de fluxo no circuito de beneficiamento e carregamento. Além do impacto no sistema produtivo (os quais podem se estender por várias horas), sobretudo no período chuvoso, a exposição ao risco dos operadores nas atividades de desobstrução é bastante elevada. Para esta pesquisa, foi utilizada uma amostra de minério de ferro proveniente da Mina do Pico. A escoabilidade foi investigada sob diferentes condições, empregando calha retangular de inclinação controlada, em escala de bancada. Os seguintes materiais de revestimento foram estudados: aço-carbono ASTM A-36 com revestimento soldado (CDP), polietileno de ultra-alta massa molecular (UHMW), hardox, borracha natural, arcoplate e poliuretano. O UHMW resultou na melhor eficiência de escoamento e menor ângulo de atrito com a parede. Nas condições testadas, o aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max não aumentou significativamente a eficiência de escoamento. Já a vibração como agente auxiliar de descarga mecânica, melhorou consideravelmente a eficiência de escoamento.

Palavras-chave: manuseio de granéis, umidade natural, minério coesivo, revestimento.

ABSTRACT

The treatment of mineral ores with natural moisture has become increasingly relevant, sometimes due to restrictions on wet operations that result in disposal of tailings in dams, and sometimes because it opens the possibility of ready mixing of various ores. The biggest difficulty in these operations is the handling of weathered materials (especially goethitic and with clay minerals), or with higher humidity, which tend to be cohesive, requiring additional care in their handling, the main challenge for the treatment of natural moisture. The correct configuration of transfer chutes, hoppers and silos is not always sufficient to avoid interruptions in flow in the processing and loading circuit. In addition to the impact on the production system (which can last for several hours), especially in the rainy season, the risk exposure of operators in clearing activities is quite high. For this research, a sample of iron ore from Mina do Pico was used. The flowability was investigated under different conditions, using a rectangular chute with controlled inclination, on a bench scale. The following coating materials were studied: ASTM A-36 carbon steel with welded coating (CDP), ultra high molecular weight polyethylene (UHMW), hardox, natural rubber, arcoplate and polyurethane. The UHMW resulted in the best flow efficiency and the lowest friction angle with the wall. Under the conditions tested, the rheological additive Slipcoat MRA™ Max did not significantly increase the flow efficiency. Vibration as an auxiliary agent for mechanical discharge, considerably improved the flow efficiency.

Keywords: bulk handling, natural moisture, cohesive ore, coating.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	18
2	OBJETIVOS.....	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1	Vazios e massa específica aparente.....	25
3.2	Massa específica aparente ou massa específica real.....	26
3.3	Tamanho das partículas.....	27
3.4	Forma das partículas.....	28
3.5	Área de superfície.....	29
3.6	Dureza da partícula.....	30
3.7	Umidade.....	30
3.8	Coesão e adesão.....	31
3.9	Ângulo de repouso.....	33
3.10	Ângulo de atrito interno e com a parede.....	35
3.11	Índice de Hausner.....	36
3.12	Resistência ao cisalhamento.....	37
3.13	Fenômenos de arqueamento.....	40
3.14	Padrões de fluxo.....	41
3.14.1	Fluxo em funil.....	42
3.14.2	Fluxo em massa.....	42
3.14.3	Fluxo expandido.....	42
3.15	Diâmetro mínimo para a descarga de silos.....	43
3.16	Auxiliares de descarga.....	45
3.16.1	Auxiliares de descarga pneumática.....	45
3.16.2	Auxiliares de descarga mecânica.....	47
3.17	Modelos físicos.....	50
3.18	Desgaste.....	51
3.18.1	Dureza dos materiais metálicos.....	53
3.19	Revestimentos.....	54
3.19.1	CDP.....	55
3.19.2	Hardox.....	55
3.19.3	Arcoplate.....	55
3.19.4	Aço-manganês.....	56
3.19.5	Cerâmica.....	56

3.19.6	Poliétileno de ultra-alta massa molecular (UHMW)	56
3.19.7	Poliuretano	57
3.19.8	Borracha	58
3.20	Chutes de transferência	59
3.20.1	Técnicas de modelagem de chutes de transferência	60
3.21	Mina do Pico	63
3.21.1	Contextualização histórica	64
3.21.2	Mina de Galinheiro	64
3.21.3	Mina de Sapecado	65
3.21.4	Processamento à umidade natural	65
4	MATERIAIS E MÉTODOS	69
4.1	Amostra	69
4.2	Coleta e preparação das amostras	70
4.3	Caracterização física	70
4.4	Análise química	71
4.5	Superfícies avaliadas nos experimentos de escoamento em laboratório	71
4.6	Aditivo reológico para os experimentos de escoamento em laboratório	71
4.7	Protótipo para experimentos de escoamento em laboratório	72
4.8	Método de avaliação da escoabilidade	74
4.8.1	Determinação do índice de Hausner (IH)	75
4.8.2	Ângulo de atrito com a parede	75
4.8.3	Eficiência de escoamento	75
4.8.4	Ensaio com vibração	76
4.8.5	Coefficiente de atrito cinético	76
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1	Composição química	77
5.2	Distribuição granulométrica	78
5.3	Determinação do índice de Hausner	79
5.4	Ângulo de atrito com a parede	80
5.5	Eficiência de escoamento	81
5.6	Ensaio com vibração	82
5.7	Determinação do coeficiente de atrito cinético	84
5.8	Ensaio de escoamento com aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max	84
6	CONCLUSÕES	87
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88

8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
---	----------------------------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Material coesivo aderido à caçamba de caminhão fora de estrada durante operação de basculamento no britador primário.....	19
Figura 2. Interrupção do fluxo devido a obstrução de chutes por minério coesivo em uma das usinas da Mina do Pico.....	19
Figura 3. Variação no índice pluviométrico e o reflexo na umidade do minério bruto (<i>run of mine — ROM</i>) na Mina do Pico ao longo de um ano.....	20
Figura 4. Influência da umidade sobre a frequência de entupimento/desprendimento de material nos chutes de uma das usinas da Mina do Pico.....	21
Figura 5. Marcos da tecnologia de manuseio de sólidos a granel.....	24
Figura 6. Picnômetro.....	26
Figura 7. Peneiras de laboratório para determinação da granulometria.....	28
Figura 8. Ponte de líquido (água) entre esférulas de vidro.....	32
Figura 9. Princípio de uma ponte líquida com fluido de baixa viscosidade (θ : ângulo da ponte).....	32
Figura 10. Força adesiva adimensional, $FH / (\gamma \cdot x)$, de uma ponte líquida entre duas partículas esféricas (diâmetro x) em função da distância adimensional, a / x (ângulo de contato $\delta = 0^\circ$).....	33
Figura 11. Representação esquemática do ângulo de repouso (α).....	34
Figura 12. Pilha cônica com ângulo variável de repouso frequentemente observada com sólidos a granel coesivos.....	35
Figura 13. Representação esquemática de aparato para determinação do ângulo e coeficiente de atrito.....	36
Figura 14. Plano de cisalhamento de uma amostra de material a granel submetido a uma força de compressão.....	38
Figura 15. Célula Jenike, tamanho padrão, para ensaios de cisalhamento.....	38
Figura 16. Círculo de Mohr.....	39
Figura 17. Representação gráfica da formação de arco em um silo.....	41
Figura 18. Padrões de fluxo que podem ser desenvolvidos em silos e moegas.....	42
Figura 19. Função de fluxo do sólido a granel (FF) e fator de fluxo da tremonha (ff).....	43
Figura 20. Fator empírico J em função da forma da tremonha e do ângulo da seção convergente.....	44

Figura 21. Auxiliares de descarga pneumática: a. tremonha porosa; b. caixa de aeração; c. almofada de aeração; d. bico de aeração; e. bico vibratório de aeração; f. canhão de ar.	46
Figura 22. Canhão de ar aplicado em silo.	47
Figura 23. Inserto vibratório.	48
Figura 24. Motovibrador instalado na parede da tremonha.	48
Figura 25. Posições recomendadas para instalação de vibradores.	49
Figura 26. Isoamortecedor e motovibrador aplicado em chute de transferência.	50
Figura 27. Modelo físico, caixa de fluxo de pequeno porte, e o modelo pelo Método dos Elementos Discretos (DEM) após calibração. Amostra de minério de ferro, <i>sinter feed</i> , da Mina de Carajás (PA).	51
Figura 28. Desgaste excessivo dos revestimentos de uma moega acima dos alimentadores. ...	52
Figura 29. Relação entre a escala de dureza de Mohs e as escalas Rockwell, Brinell e Vickers.	54
Figura 30. Revestimento UHMW aplicado em chute de <i>undersize</i> após 30 dias de operação.	57
Figura 31. Projeto de sistema <i>hood & spoon</i> desenvolvido pela Jenike & Johanson.	59
Figura 32. Representação gráfica do ângulo de impacto (θ_i), velocidades de impacto (V_i) e velocidade ao longo do chute após o impacto (V_2).	62
Figura 33. Sistemas de produção de minério de ferro da Vale no Brasil.	63
Figura 34. Instalação de tratamento de minério I (ITM-I) adaptada para processamento à umidade natural.	65
Figura 35. Desenho 3D da peneira Haver TD 8' x 24'.	66
Figura 36. Tela em poliuretano autolimpante, abertura 19,0 mm.	67
Figura 37. Influência da umidade sobre a taxa de alimentação da ITM-I da Mina do Pico.	67
Figura 38. Estratégia de controle avançado da taxa de alimentação da usina.	68
Figura 39. Fluxograma da ITM-I à umidade natural, Mina do Pico.	69
Figura 40. Representação esquemática da preparação da amostra e os dados utilizados durante a pesquisa.	70
Figura 41. Protótipo da calha de inclinação controlada.	73
Figura 42. Calha de inclinação controlada para ensaios de escoamento em laboratório: a. visão geral; b. detalhe do sistema de elevação e medição do ângulo.	73
Figura 43. Metodologia para avaliação da escoabilidade de minérios coesivos.	74
Figura 44. Aparato para ensaio com vibração: a. calha de inclinação controlada instalada sobre mesa vibratória; b. motovibrador sob a mesa.	76

Figura 45. Disco de madeira com partículas de minério coladas em uma das faces para avaliação do coeficiente de atrito cinético.....	77
Figura 46. Distribuição granulométrica do produto da usina ITM-I da Mina do Pico.....	78
Figura 47. Distribuição granulométrica real (experimento) e o modelo de Rosin-Rammler..	79
Figura 48. Índice de Hausner da amostra global para três níveis de umidade.	79
Figura 49. Índice de Hausner (IH) em diferentes patamares de umidade.	80
Figura 50. Ângulo de atrito com a parede para os diferentes revestimentos testados.....	81
Figura 51. Eficiência de escoamento no ângulo de 30° para os diferentes revestimentos.	81
Figura 52. Ensaios de eficiência de escoamento: a. Arcoplate; b. UHMW Duramaxx; c. Hardox 400; d. poliuretano; e. borracha natural; f. CDP.....	82
Figura 53. Eficiência de escoamento com uso de vibração em revestimento de borracha.....	83
Figura 54. Coeficiente de atrito cinético (μ_k) entre o minério e as diferentes superfícies avaliadas.	84
Figura 55. Eficiência de escoamento considerando aplicação de aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max sobre revestimento CDP.....	85
Figura 56. Aplicação do aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max sobre revestimento Hardox.	85
Figura 57. Comparação da escoabilidade com e sem aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max sobre revestimento Hardox.....	86
Figura 58. Partículas aderidas à superfície após aplicação do aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Escala de Mohs	30
Tabela 2. Classificação do estado de acordo com a quantidade de líquido.....	31
Tabela 3. Tipo de escoamento de acordo com o ângulo de repouso.	34
Tabela 4. Tipo de escoamento de acordo com o índice de Hausner.....	37
Tabela 5. Critérios de escoabilidade a partir da função de fluxo.	40
Tabela 6. Equações lineares para determinação do fator J em função da forma da tremonha e do ângulo da seção convergente.	45
Tabela 7. Técnicas de ensaio de dureza para materiais metálicos.....	53
Tabela 8. Amostras de revestimentos industriais avaliadas na pesquisa.	71
Tabela 9. Amostra de aditivo reológico avaliado na pesquisa.	72
Tabela 10. Propriedades físico-químicas do aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max.	72
Tabela 11. Análise química por faixa granulométrica.....	77
Tabela 12. Eficiência de escoamento com vibração nos diferentes revestimentos.	83

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	fração de vazios
$V_{sólidos}$	Volume dos sólidos
V_{vazios}	Volume de vazios
ρ_{ap}	massa específica aparente
ρ_s	massa específica real do sólido
ρ_l	massa específica do líquido
Y_i	Porcentagem passante acumulada na classe de tamanho i
d_i	Tamanho da classe i
d_{50}	Tamanho mediano da distribuição
m	Parâmetro de agudez
ψ_s	Esfericidade
d_v	Diâmetro da esfera de mesmo volume
d_s	Diâmetro da partícula
A_{sp}	Área superficial da partícula
Θ	Ângulo da ponte de líquido
δ	Ângulo de contato
α	Ângulo de repouso
β	Ângulo de atrito com a parede
IH	índice de Hausner
ρ_c	Massa específica aparente compactada
ρ_A	Massa específica aparente “solta”
YL	Círculo de Mohr: <i>Yield Locus</i>
c	Coesão
τ	Tensão cisalhante
σ	Tensão normal
σ_l	Tensão de consolidação
σ_c	Tensão não confinada
ϕ_i	Ângulo de atrito interno
FF	Função de fluxo
ϕ_e	Ângulo de atrito interno efetivo
ϕ_x	Ângulo de atrito material-parede

σ_a	Tensão atuante em um arco estável hipotético
ff	fator de fluxo
σ_{crit}	Tensão crítica
J	Fator adimensional empírico
g	Aceleração da gravidade
D_{min}	Dimensão de saída da tremonha
Q	Vazão volumétrica
V	Velocidade de escoamento
A	Área da seção transversal do chute
V_0	Velocidade inicial
A	Aceleração
s	Distância percorrida
θ	Inclinação do chute a partir da vertical
μE	Atrito equivalente constante
h	Altura de queda
P_i	Pressão de impacto no carregamento
V_i	Velocidade de impacto
θ_i	Ângulo de impacto
V_2	Velocidade ao longo do chute após o impacto
W_a	Taxa de desgaste abrasivo na correia
μ_l	Coefficiente de atrito entre o material a granel e a correia
V_B	Velocidade da correia
V_L	Velocidade de carregamento do material a granel

1 INTRODUÇÃO

A produção de minério de ferro no Brasil gira em torno de 460 Mta (MME, 2020), sendo 302 Mta, produzidas somente pela Vale S.A. em diferentes regiões do país, onde atualmente mais de 60 % da produção de minério de ferro é oriunda de processamento a umidade natural (VALE, 2020).

Em geral, as operações unitárias destes circuitos são relativamente simples, constituindo-se basicamente de cominuição em diferentes etapas e classificação por peneiramento. Obviamente, ainda há melhorias a serem implementadas nessas fases, mas é durante o manuseio que os desafios aumentam. Não é rara a ocorrência de acidentes operacionais e até, infelizmente, pessoais envolvendo entupimentos de chutes, tremonhas ou silos decorrentes do processamento de minérios mais hidratados e conseqüentemente mais coesivos, além de projetos inadequados das instalações.

Atualmente é bastante comum a análise de fluxo e a execução de simulação de escoamento utilizando método de elementos discretos (*Discret Element Method* – DEM) antes da construção dos novos projetos, porém nas usinas mais antigas, essa prática não era uma regra, até porque as características dos minérios eram bastante diferentes dos atuais, com menores teores de contaminantes e de umidade.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

As quantidades removidas das minas, transferidas para as usinas e eventualmente estocadas são bastante significativas e compreendem uma parte importante para o processo produtivo. Chaves (2012) destaca ainda, que nas minas e pátios de estocagem a tendência moderna é usar cada vez mais equipamentos contínuos, pelas vantagens decorrentes do tipo de transporte, consumo de energia elétrica em vez de diesel, menores problemas operacionais, possibilidade de total automação e por facilitarem o trabalho em série com transportadores de correia. Um ponto de atenção ainda na fase da mina, é a geração de “carga morta”, proveniente de material coesivo aderido às caçambas dos caminhões (Figura 1). Além da redução do volume útil há aumento de consumo específico de diesel e de pneus.

Figura 1. Material coesivo aderido à caçamba de caminhão fora de estrada durante operação de basculamento no britador primário.



Fonte: Próprio autor.

Schulze (2008) cita que, quando uma planta é projetada, silos, tremonhas e chutes geralmente não são o objetivo principal do projeto, pois não contribuem muito para o processamento dos materiais como, por exemplo, um britador ou uma peneira. Por outro lado, o emprego de geometrias e revestimentos inadequados em silos e chutes podem reduzir o rendimento operacional da usina como um todo, impactando significativamente na sua capacidade e confiabilidade (Figura 2).

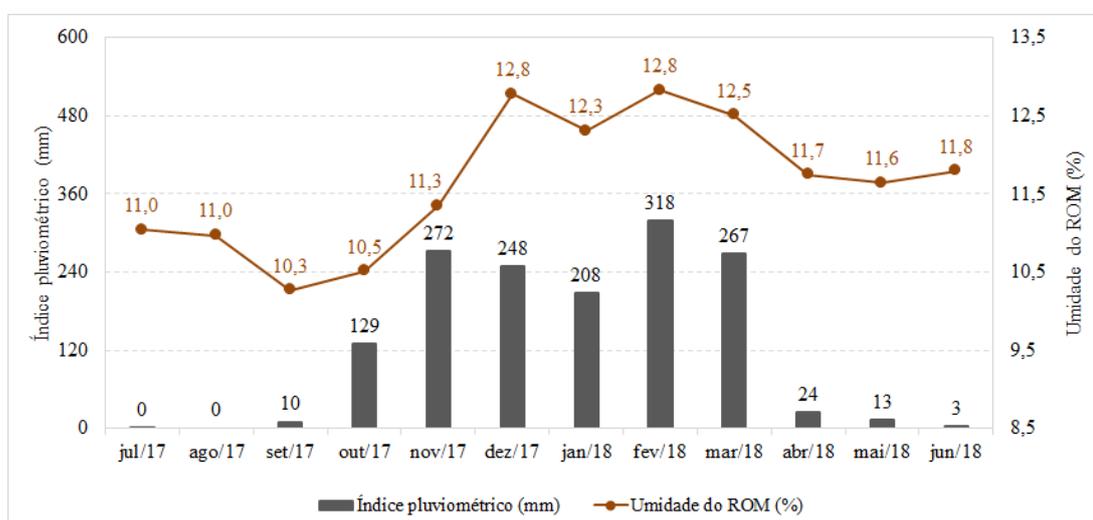
Figura 2. Interrupção do fluxo devido a obstrução de chutes por minério coesivo em uma das usinas da Mina do Pico.



Fonte: Próprio autor.

O aumento da umidade normalmente é um dos fatores predominantes para os eventos indesejáveis relacionados ao manuseio deste tipo de material. Esse aumento pode estar associado à composição mineralógica ou simplesmente à ocorrência de chuvas, quando ocorre mudança no patamar de umidade após o início do período chuvoso (Figura 3). Em investigação semelhante para minérios de cobre, Cabrejos (2017) confirmou, como esperado, que o teor de umidade afeta fortemente a fluidez do material a granel, aumentando sua força de coesão e tornando-os mais propensos a criar problemas de fluxo.

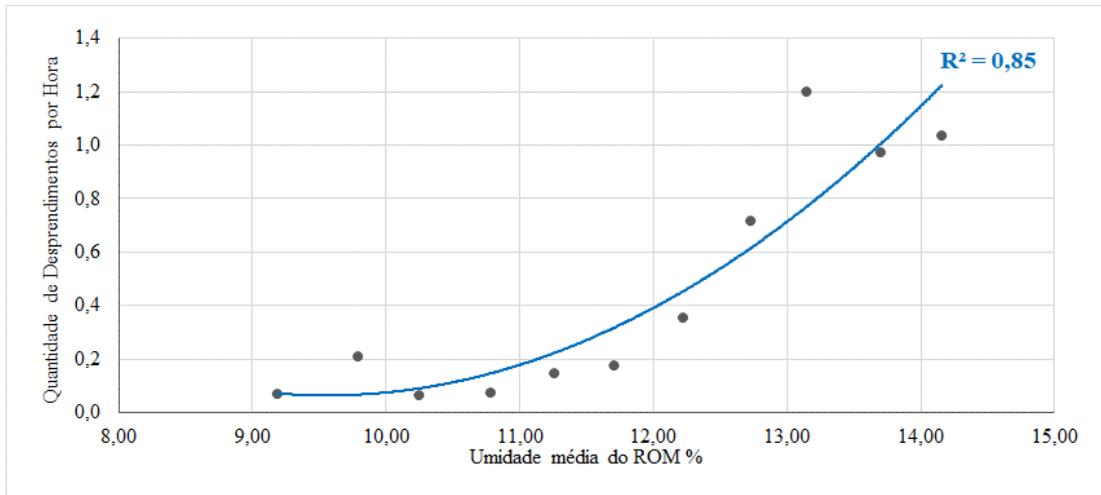
Figura 3. Variação no índice pluviométrico e o reflexo na umidade do minério bruto (*run of mine* — ROM) na Mina do Pico ao longo de um ano.



Fonte: GONÇALVES e BAETA (2019).

Do ponto de vista de desempenho operacional dos sistemas de manuseio composto por chutes de transferência e transportadores de correia, o aumento da umidade provoca maior frequência de acúmulo e desprendimento de material nas paredes dos chutes. Gonçalves e Baeta (2019) utilizaram a corrente elétrica do motor de acionamento de um transportador de correia, para quantificar a frequência de ocorrências de desprendimentos de material dos chutes de alimentação. Para esta quantificação, foi desenvolvido o cálculo de contagem dos eventos de mudança súbita da corrente elétrica por meio do controlador lógico programável (*Programmable Logic Controller* – PLC) da usina. A causa dessas ocorrências foi identificada como minério úmido sendo desprendido das paredes (Figura 4). Esse tipo de falha é citado por Chaves (2012) como muito grave, uma vez que grandes massas podem desabar subitamente, e esse impacto pode causar a ruína total da estrutura.

Figura 4. Influência da umidade sobre a frequência de entupimento/desprendimento de material nos chutes de uma das usinas da Mina do Pico.



Fonte: GONÇALVES e BAETA (2019).

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho foi estudar diferentes alternativas de superfícies de revestimentos internos de equipamentos de manuseio, utilizando ou não aditivo reológico, para otimizar o escoamento de minério de ferro coesivo sob umidade natural.

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- a. Caracterização do material quanto a escoabilidade;
- b. Avaliação da escoabilidade em diferentes superfícies;
- c. Avaliação da escoabilidade utilizando aditivo reológico;
- d. Identificar as melhores alternativas ou combinação entre elas para otimizar a escoabilidade de minérios coesivos em calhas e chutes de transferência;
- e. Avaliar o impacto da vibração na escoabilidade dos graneis ensaiados.

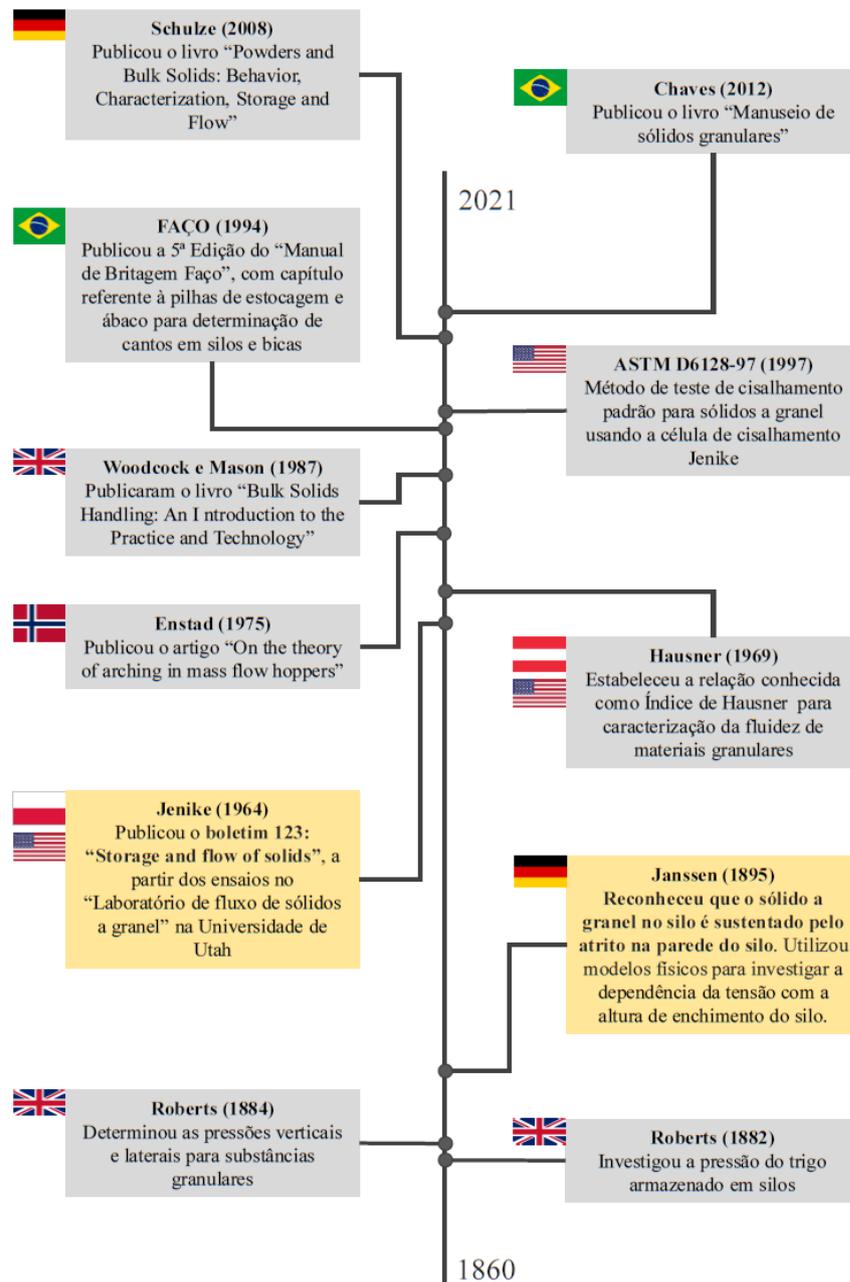
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O manuseio de materiais é descrito por Chaves (2002) como uma parte das operações auxiliares que compõem o tratamento de minérios, apesar disso Silva (2005) cita, que a atividade de estocagem, como todas as atividades de movimentação ou manuseio de materiais granulares, situa-se numa área interdisciplinar, não sendo totalmente coberta por nenhuma especialidade do conhecimento. Woodcock e Mason (1995) afirmam que, ao longo dos anos, as propriedades e características de manuseio de líquidos e gases foi considerada um requisito essencial para a maioria dos engenheiros em atividade, mas por outro lado não houve desenvolvimento semelhante para a disciplina relacionada de manuseio de sólidos a granel. Os primeiros trabalhos nessa área são atribuídos a Roberts (1884) e Janssen (1895) *apud* Schulze (2008). Roberts (1884) investigou a pressão do trigo armazenado em silos e determinou as pressões verticais e laterais para substâncias granulares, enquanto Janssen (1895) utilizou modelos físicos para investigar a dependência da tensão com a altura de enchimento do silo, reconhecendo que um sólido a granel é sustentado pelo atrito na parede do silo. Janssen derivou uma equação de equilíbrio de forças em uma fatia diferencial do sólido a granel no silo. Essa equação, que permite o cálculo de tensões na seção vertical de um silo, ainda hoje é aplicada e é conhecida como “equação de Janssen”, e faz parte dos códigos de projeto de silos em vários países (SCHULZE, 2008).

As pesquisas mais importantes na área de manuseio de sólidos a granel foram desenvolvidas pelo engenheiro Dr. Andrew W. Jenike, quando nos anos 50 do século XX, procurou um campo em que pudesse dar uma contribuição científica e de engenharia única e significativa. Com apoio financeiro de diferentes fontes, Jenike montou o “Laboratório de fluxo de sólidos a granel” na Universidade de Utah (SCHULZE, 2008). Os resultados deste extenso trabalho foram publicados no início da década de 60 (JENIKE, 1964) e servem de referência até os dias atuais.

No Brasil os trabalhos e publicações relacionadas ao de manuseio de sólidos a granel é relativamente recente. Durante muitos anos as instalações de processamento de minérios tiveram como base as recomendações publicadas nos manuais de britagem da antiga Fábrica de Aço Paulista (FAÇO), que apesar de não ser uma literatura específica de manuseio de materiais, já apresentava um capítulo referente à pilhas de estocagem, além de ábaco para determinação de cantos em silos e bicas. A Figura 5 ilustra alguns marcos da tecnologia de sólidos a granel ao longo dos anos, com destaque para as pesquisas de Janssen (1895) *apud* Schulze (2008) e Jenike (1964).

Figura 5. Marcos da tecnologia de manuseio de sólidos a granel.



Fonte: Próprio autor.

O conhecimento das características dos materiais a granel, incluindo suas propriedades de fluxo permite projetar novas instalações ou otimizar equipamentos existentes, evitando paradas de produção devido à formação de obstruções em chutes, arcos coesivos e/ou formação de canal (*ratholes*) em silos. Esses são os problemas mais comuns, de acordo com Ruiz, Cabrejos e Mazzinghy (2014).

Nesta pesquisa não se buscou desenvolver um método em substituição à teoria clássica desenvolvida por Jenike, mas sim criar uma metodologia de avaliação preliminar, que possa ser empregada por estudantes e profissionais que atuam na área de manuseio de materiais coesivos, especialmente no sentido de identificar qual o revestimento mais adequado para uma determinada aplicação. Inicialmente serão abordados os conceitos básicos relacionados às características dos materiais a granel, dos revestimentos e parâmetros de escoamento em chutes, seguido de breve descrição do processo produtivo da Mina do Pico, cujos dados industriais são citados nessa dissertação. Na sequência o desenvolvimento da metodologia de avaliação, bem como os ensaios de escoamento de minério coesivo em escala de laboratório são abordados como foco principal desta pesquisa.

3.1 Vazios e massa específica aparente

A forma e a distribuição de tamanhos das partículas que constituem um sólido a granel influem diretamente na quantidade de espaço livre entre elas. Dessa forma um sólido a granel é realmente uma combinação de partículas e interstícios, sendo a porcentagem do volume total não ocupada pelas partículas (ε) geralmente referida como fração de vazios, de acordo com a equação 1 (WOODCOCK e MASON, 1995).

$$\varepsilon = \frac{V_{sólidos}}{V_{sólidos} + V_{vazios}} \quad (1)$$

A presença de vazios nos granéis influi diretamente na massa específica aparente (ρ_{ap}), que é a relação entre a massa e o volume total, conforme equação 2.

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V_{sólidos} + V_{vazios}} \quad (2)$$

A fração de vazios intersticiais da amostra pode ser obtida de modo simples em laboratório (Milhomem e Da Luz, 2016), correlacionando a massa específica real do sólido (ρ_s) e a massa específica aparente do granel por meio da equação 3. Esta equação é válida para material isento de umidade.

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_{ap}}{\rho_s} \quad (3)$$

3.2 Massa específica aparente ou massa específica real

Na área de manuseio de materiais o entendimento do conceito de massa específica aparente é essencial para projetar embarcações, silos de armazenamento, sistemas de manuseio e similares. Por outro lado, é importante que a distinção entre a massa específica aparente de um sólido particulado e a massa específica de partículas seja claramente entendida. Para uma única partícula, a massa específica é definida como a massa da partícula dividida pelo seu volume, de modo que, para um material a granel, a massa específica média das partículas pode ser determinada dividindo-se a massa do material pelo volume real ocupado pelas partículas, não incluindo os vazios (WOODCOCK e MASON, 1995).

A massa específica real das partículas pode ser determinada por picnometria (para finos), ou pesando o material em balança de precisão e em seguida transferindo a amostra para um recipiente graduado, por exemplo uma proveta, onde o volume pode ser medido pelo método do deslocamento do líquido, após completa eliminação de bolhas e microbolhas. Segundo Sampaio e Da Silva (2007), uma das técnicas utilizadas para medir a massa específica de sólidos é o método do picnômetro. Um picnômetro consiste, basicamente, num balão de vidro com fundo chato, equipado com uma rolha de Gay-Lussac, também de vidro, através da qual passa um canal capilar, para ajuste fino do volume de controle (Figura 6).

Figura 6. Picnômetro.



Fonte: LABORGLAS (2021).

Para determinação da massa específica real por meio da técnica do picnômetro é necessária uma balança de precisão, com, no mínimo, duas casas decimais, e o cálculo da massa específica é efetuado aplicando a equação 4.

$$\rho_s = \frac{(M_2 - M_1)\rho_l}{(M_4 + M_2) - (M_1 + M_3)} \quad (4)$$

Onde:

ρ_s — Massa específica dos sólidos; ρ_l — Massa específica do líquido (em geral, água); M_1 — Massa do picnômetro; M_2 — Massa do picnômetro mais amostra; M_3 — Massa do picnômetro mais amostra e mais água; M_4 — Massa do picnômetro mais água.

3.3 Tamanho das partículas

Segundo Woodcock e Mason (1995), existem vários termos que podem ser utilizados para fornecer uma indicação qualitativa do tamanho das partículas que constituem um sólido a granel, sendo a palavra “tamanho” usada livremente para significar algum tipo de dimensão média característica em toda a partícula. Naturalmente, esses termos não são precisos e tendem a variar no uso de um setor para outro.

Chaves (2002) destaca que o conceito de “tamanho”, embora primário para todos nós, é muito difícil de ser corretamente entendido, e especialmente entendido da mesma maneira por todos, e que em Tratamento de Minérios não trabalhamos nunca com partículas individuais, mas sempre com populações de partículas. Dessa forma, a medida direta de tamanhos individuais é substituída pela medida de frequências relativas de partículas dentro de determinados intervalos.

Dentre os vários métodos de quantificação da distribuição granulométrica dos materiais existentes, o ensaio de peneiramento em laboratório tem larga utilização, especialmente para caracterização de minérios nas fases de britagem, peneiramento, classificação e nas diferentes etapas de manuseio por transportadores de correia ou por bombeamento de polpas.

O procedimento resumido para a análise granulométrica por peneiramento consiste em montar a série de peneiras escolhidas (Figura 7), em ordem decrescente de abertura da tela. No formato das peneiras, existe um encaixe, de modo que não haja perdas de material, uma tampa e um fundo.

Figura 7. Peneiras de laboratório para determinação da granulometria.



Fonte: SPLABOR (2021).

A massa de minério a ser analisada é colocada na tela de maior abertura. O conjunto é levado a um dispositivo vibrador e deixado vibrar por um tempo suficiente para que haja a separação das partículas de diferentes tamanhos. As massas retidas em cada peneira são pesadas e posteriormente determinadas as porcentagens retidas, acumulada e passante em cada malha, sendo que a porcentagem passante acumulada é a mais tradicional forma de representar a distribuição granulométrica de um determinado material.

A distribuição de tamanhos também pode ser modelada matematicamente por uma equação, na qual a partir de alguns parâmetros conhecidos ou determinados, é possível prever a porcentagem passante em qualquer classe de tamanho. Uma das equações mais usuais para esta aplicação é a de Rosin-Rammler (equação 5).

$$Y_i = 100 \cdot \left[1 - e^{-0,693 \cdot \left(\frac{d_i}{d_{50}}\right)^m} \right] \quad (5)$$

Onde:

Y_i — Porcentagem passante acumulada na classe de tamanho i ; d_i — Tamanho da classe i ;
 d_{50} — Tamanho mediano da distribuição; m — Parâmetro de agudez.

3.4 Forma das partículas

Nas operações de tratamento de minérios de uma forma geral, além da distribuição de tamanho, é muito importante o conhecimento da forma típica das partículas que constituem o material a ser processado. De acordo com Woodcock e Mason (1995) a forma das partículas

constituintes em um sólido a granel é uma característica importante, pois tem uma influência significativa em seu comportamento de empacotamento e fluxo. Por outro lado, Schulze (2008), afirma que, embora o formato da partícula afete as propriedades do fluxo, não é possível fazer declarações gerais sobre esse efeito, uma vez que o efeito da superfície das partículas tem influência significativa sobre a escoabilidade de sólidos a granel. Como exemplo ele cita que para material grosseiro (maior do que 0,5 mm), muitas vezes é verificado que as partículas lisas e esféricas fluem melhor do que as partículas ásperas, de arestas vivas e não esféricas. Schulze (2008) afirma ainda que para sólidos a granel coesos, uma declaração não é tão fácil, uma vez que as forças adesivas interpartículas desempenham o papel principal.

Os termos esférica, cúbica e laminar (ou acicular) são comumente encontrados nas diversas literaturas especializadas para caracterizar a forma predominante das partículas. Representar a forma de partículas não esféricas em termos matemáticos não é tão simples, mas muitas tentativas foram feitas para estabelecer o uso de fatores de forma para indicar até que ponto as partículas diferem das esféricas.

Segundo Woodcock e Mason (1995), provavelmente a esfericidade de Wadell, que é a relação entre a área superficial de uma esfera de mesmo volume e a área superficial da partícula, seja o parâmetro morfométrico mais utilizado (equação 6).

$$\psi_s = \frac{\pi \cdot d_v^2}{A_{sp}} = \left(\frac{d_v}{d_s}\right)^2 \quad (6)$$

Onde:

ψ_s — Esfericidade; d_v — Diâmetro da esfera de mesmo volume; d_s — Diâmetro da partícula; A_{sp} — Área superficial da partícula.

3.5 Área de superfície

Tanto no manuseio de materiais, quanto no tratamento de minérios em geral, não é usual efetuar medidas de superfície de partículas. A prática tem sido executar medidas indiretas e determinar a superfície específica da amostra. De acordo com Chaves (2002) existem vários processos de medida de superfície: adsorção de gases, permeabilidade pelo método de Blaine, permeabilidade pelo método de Fischer, etc. Na indústria de cimento e nas operações de pelotização de minério de ferro, a permeabilidade pelo método de Blaine é o parâmetro mais empregado. Como a superfície específica é inversamente proporcional ao tamanho da partícula,

esse parâmetro às vezes é usado para indicar a "finura" do material (WOODCOCK e MASON, 1995).

3.6 Dureza da partícula

Conhecer a dureza das partículas do material é fundamental para definição do tipo de revestimento a ser aplicado em chutes de transferência, silos ou mesmo em tubulação, para o caso de fluxos bombeados. Em geral, quanto mais duras as partículas, mais abrasivo será o produto nos materiais com os quais a instalação de manuseio é construída, conforme afirmam Woodcock e Mason (1995). O método comumente utilizado para determinação de dureza das partículas minerais é através da escala semiquantitativa proposta por Friedrich Vilar Mohs em 1822, que consiste em 10 minerais ordenados de forma crescente, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Escala de Mohs

Mineral	Composição	Dureza
Talco	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	1
Gipsita	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2
Calcita	$CaCO_3$	3
Fluorita	CaF_2	4
Apatita	$Ca_5(PO_4)_3(Cl, F)$	5
Feldspato	$KAlSi_3O_8$	6
Quartzo	SiO_2	7
Topázio	$Al_2(F,OH)_2SiO_4$	8
Coríndon	Al_2O_3	9
Diamante	C	10

Fonte: Adaptado de WOODCOCK e MASON (1995)

3.7 Umidade

Umidade é a quantidade de água presente na massa úmida do material, expressa em termos percentuais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Apesar desse conceito e o seu uso bastante difundido, Chaves (2002) afirma que na área de tratamento de minérios a referência normalmente utilizada é umidade base seca, onde a quantidade de água é

expressa em termos percentuais em relação à massa seca de sólidos após secagem. No transcorrer deste trabalho será adotado como padrão a umidade base úmida, conforme equação 7.

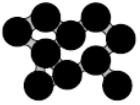
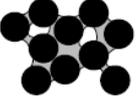
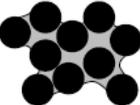
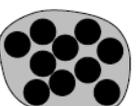
$$Umidade = \left(\frac{Massa\ úmida - Massa\ seca}{Massa\ úmida} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

3.8 Coesão e adesão

A fluidez de um material a granel em chutes, tremonhas ou silos depende de diversos fatores, sejam do próprio material ou mesmo em relação a características geométricas dos sistemas de manuseio e armazenamento. Do ponto de vista das características que afetam o movimento do material, certamente a coesividade é a mais que mais merece atenção (CHAVES, 2012).

MITARAI e NORI (2006) relacionaram a coesividade em função da quantidade de conteúdo líquido presente no material, classificado em quatro estados: pendular, funicular, capilar e estado de pasta (Tabela 2).

Tabela 2. Classificação do estado de acordo com a quantidade de líquido.

Estado	Diagrama esquemático	Descrição física
Seco		A coesão entre as partículas é insignificante.
Pendular		As pontes líquidas são formadas nos pontos de contato das partículas. Forças coesivas atuam através das pontes líquidas.
Funicular		As pontes líquidas ao redor dos pontos de contato e os poros cheios de líquido coexistem, e ambos dão origem à coesão entre as partículas.
Capilar		Quase todos os poros são preenchidos com o líquido, mas a superfície do líquido forma meniscos e a pressão do líquido é inferior à pressão do ar. Essa sucção resulta em uma interação coesa entre as partículas.
Pasta		A pressão do líquido é igual ou superior à pressão do ar. Não há interação coesa entre as partículas.

Fonte: MITARAI e NORI (2006).

De acordo com Schulze (2008) para os sólidos a granel secos de granulação fina, as principais forças adesivas são devidas às interações de Van der Waals e às forças eletrostáticas, porém essa pesquisa está concentrada no manuseio de minério de ferro coesivo sob umidade natural, onde normalmente os maiores problemas de escoamento estão relacionados à presença de argila ou de finos, associados à umidade intrínseca do *run of mine (ROM)*, conforme citado também por Chaves (2012). Dessa forma, a segunda possibilidade apontada por Schulze (2008), que se refere aos sólidos a granel úmidos é a mais adequada. Nesses casos as pontes de líquido entre as partículas geralmente são mais importantes (Figura 8).

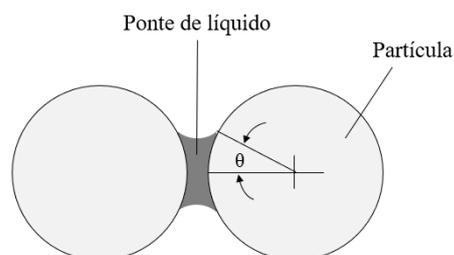
Figura 8. Ponte de líquido (água) entre esférulas de vidro.



Fonte: DA LUZ (2020).

Essas pontes são formadas por pequenas regiões de líquido com viscosidade suficientemente baixa na zona de contato das partículas. Quando a superfície das partículas é umedecida por uma certa quantidade de líquido móvel, haverá interação caracterizada pela presença de um menisco que liga essas partículas (Figura 9).

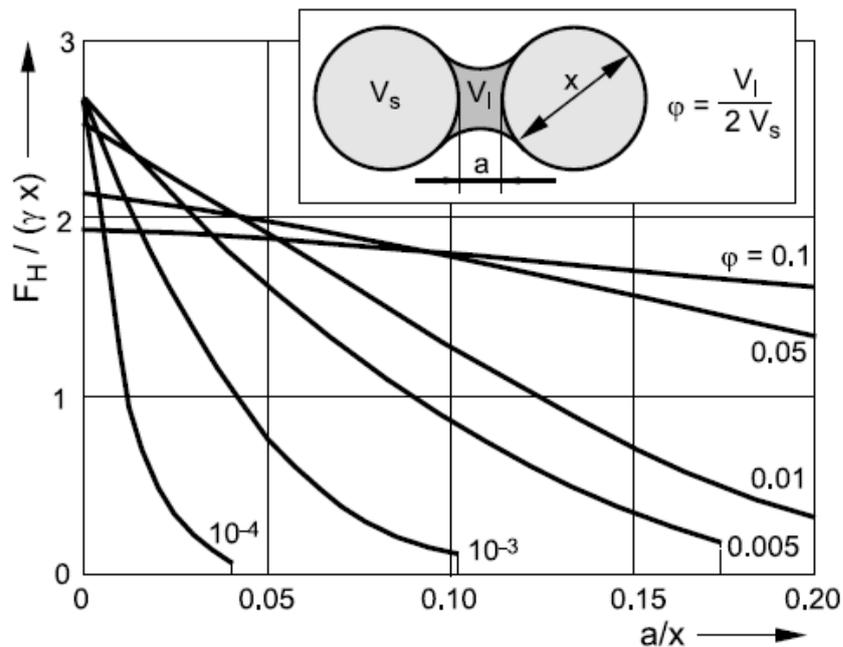
Figura 9. Princípio de uma ponte líquida com fluido de baixa viscosidade (θ : ângulo da ponte)



Fonte: Adaptado de SCHULZE (2008)

Schulze (2008) afirma ainda, que a força adesiva de uma ponte de líquido é fortemente dependente da quantidade de líquido. Se apenas uma pequena quantidade de líquido estiver presente, a variação da distância tem uma forte influência na forma da ponte líquida e, portanto, na força adesiva. Além disso, devido à quantidade limitada de líquido, as pontes de líquido estáveis são possíveis apenas em pequenos valores da distância. Em contraste com isso, para valores mais altos da porção de líquido, a influência da distância é menor, conforme mostra a Figura 10.

Figura 10. Força adesiva adimensional, $F_H / (\gamma \cdot x)$, de uma ponte líquida entre duas partículas esféricas (diâmetro x) em função da distância adimensional, a / x (ângulo de contato $\delta = 0^\circ$)

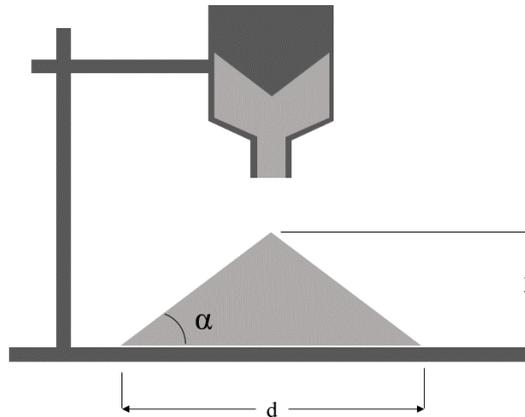


Fonte: SCHUBERT (1972) e RUMPF (1974), *apud* SCHULZE (2008), p. 25.

3.9 Ângulo de repouso

Ângulo de repouso é uma das primeiras propriedades para caracterização da escoabilidade dos materiais sólidos a granel. De acordo com Chaves (2012) o ângulo de repouso é o ângulo que a pilha do material, deixado acumular-se livremente, formará com a horizontal. O ângulo de repouso é aquele cuja tangente é igual a razão $[h/(d/2)]$, conforme Figura 11.

Figura 11. Representação esquemática do ângulo de repouso (α).



Fonte: Próprio autor.

A escoabilidade de materiais sólidos a granel pode ser estimada de acordo com o ângulo de repouso. Apesar disso alguns autores têm apresentado valores ligeiramente diferentes para as faixas de ângulos em suas respectivas publicações, mas todas seguem o mesmo racional: menor ângulo, melhor escoamento. Maior ângulo, mais difícil o escoamento (Tabela 3).

Tabela 3. Tipo de escoamento de acordo com o ângulo de repouso.

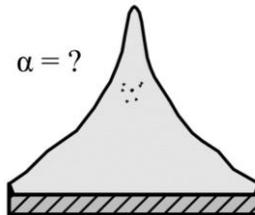
Ângulo de repouso (α)	Condição de escoamento
25 a 30°	Escoamento livre
30 a 38°	Escoamento fácil
38 a 45°	Escoamento regular / Pode gerar instabilidade no escoamento
45 a 55°	Material coesivo / Pode requerer revestimento e/ou dispositivo especial
> 55°	Material muito coesivo / Requer revestimento e/ou dispositivo especial

Fonte: MILHOMEM e DA LUZ (2016).

Schulze (2008) cita a dificuldade em determinar o ângulo em pilhas cônicas para sólidos a granel coesivos, em função da mudança dele ao longo da sua formação e afirma que nenhuma declaração é possível sobre o comportamento do material sob maiores tensões ou sobre a consolidação do tempo (Figura 12). Ainda de acordo com Schulze (2008), o ângulo de repouso

depende do procedimento de ensaio (por exemplo, a forma como a pilha é formada) e, portanto, não é uma propriedade intrínseca do sólido a granel.

Figura 12. Pilha cônica com ângulo variável de repouso frequentemente observada com sólidos a granel coesivos.



Fonte: SCHULZE (2008).

Jenike (1960) *apud* Kaizer (2004) destaca que é natural encontrar diferentes ângulos de repouso em diferentes partes de uma pilha cônica. A popularidade do ângulo de repouso entre engenheiros e pesquisadores, não é devido à sua utilidade, mas à facilidade de medição (JENIKE, 1964).

3.10 Ângulo de atrito interno e com a parede

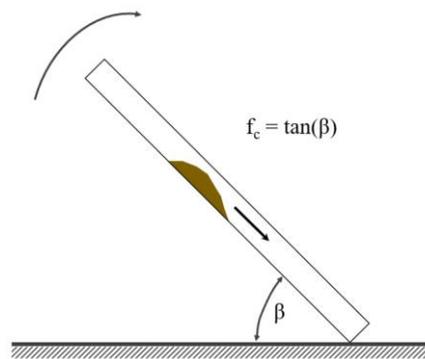
O ângulo de atrito é o ângulo de escoamento em que o material partindo do repouso, escoará, que pode acontecer caso o material deslize sobre si mesmo (ângulo de atrito interno) ou sobre uma superfície (ângulo de atrito com a parede). No ensaio de cisalhamento o ângulo de atrito interno é o ângulo formado com o eixo das tensões normais pela tangente à curva envoltória do círculo de Mohr, sob diferentes tensões normais (ABGE, 1976 *apud* SILVA, 2005).

De acordo com Silva e Hennies (1988) *apud* Silva (2005), o ângulo de atrito interno é função do grau de rugosidade e angulosidade dos elementos que constituem o material. Se esses elementos são livres e separados, mas angulosos, o seu valor será de 37 a 42°. Se os fragmentos estão envolvidos por partículas de argila úmida, o ângulo não será maior que 30°. Mas se estão separados por camadas de argila, o ângulo de atrito interno não alcançará 25°.

Silva (2005) determinou o ângulo de atrito com a parede, a partir de ensaios em modelo físico, onde a amostra do material foi fixada em porção de fita adesiva, para evitar o rolamento das partículas. Desse conjunto foi apoiada a face com material em superfície de papelão; variou-se a inclinação da superfície até o escorregamento da fita com material, determinando-se o

ângulo de atrito com a parede. Em experimento semelhante, porém com material solto, Rastogi *et al* (1993) determinaram o coeficiente de atrito interno para carvões ultrafinos, medindo a tangente do menor ângulo que um plano inclinado deve fazer com a horizontal para provocar o fluxo do material (Figura 13).

Figura 13. Representação esquemática de aparato para determinação do ângulo e coeficiente de atrito.



Fonte: Adaptado de RASTOGI et al (1993).

3.11 Índice de Hausner

O índice de Hausner (IH), desenvolvido pelo engenheiro Henry H. Hausner, é baseado na influência das forças adesivas interpartículas sobre a massa específica aparente dos sólidos a granel. Em materiais sólidos soltos de baixa fluidez (coesivos), vazios relativamente grandes são formados devido à ação das forças adesivas. Este fato não ocorre com sólidos a granel de fluxo livre. Dessa forma, é de se esperar que os sólidos a granel com maior dificuldade de escoamento sejam mais compressíveis (SCHULZE, 2008).

A determinação consiste na razão entre a massa específica aparente compactada e a massa específica aparente “solta” (equação 8).

$$IH = \frac{\rho_C}{\rho_A} \quad (8)$$

A relação entre o índice de Hausner e a respectiva caracterização da escoabilidade dos materiais têm sido amplamente discutida por diferentes pesquisadores ao longo das últimas décadas, sobretudo na área de ciências farmacêuticas, onde este parâmetro é largamente utilizado para caracterização dos diferentes materiais manuseados. Milhomem e Da Luz (2016),

apresentaram uma interpretação simplificada do IH, na qual os valores menores que 1,25 indicam boa fluidez. A faixa intermediária entre 1,25 e 1,50, tende a necessitar de lubrificantes ou revestimentos especiais, enquanto, que na faixa acima de 1,50, o escoamento é muito difícil (Tabela 4).

Tabela 4. Tipo de escoamento de acordo com o índice de Hausner.

Índice de Hausner (IH)	Condição de Escoamento
< 1,25	Escoamento livre
1,25 a 1,50	Material coesivo / Pode necessitar de lubrificantes ou revestimentos especiais
> 1,50	Escoamento muito difícil

Fonte: MILHOMEM e DA LUZ (2016).

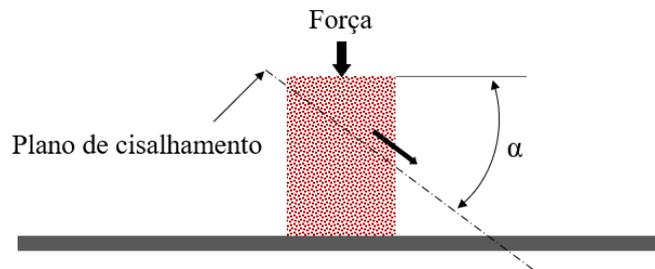
Riley e Mann (1972) afirmam que o IH é uma característica útil de um sistema composto por material particulado, e tem a virtude de ser facilmente mensurável com aparelhos simples e de baixo custo.

A determinação das propriedades de fluxo relevantes para a caracterização, manuseio e processamento de materiais a granel é efetuada, normalmente, por ensaio de cisalhamento. Recentemente, Saw et al (2015) correlacionaram as propriedades de fluxo medidas por célula de cisalhamento e o IH, chegando à conclusão de que o erro de correlação é pequeno para materiais categorizados como coesos e muito coesos.

3.12 Resistência ao cisalhamento

A aplicação de qualquer força a um material sólido a granel, que tende a causar deformação por cisalhamento resultará em uma força resistiva oposta, da mesma forma como acontece com materiais contínuos, conforme afirmam Woodcock e Mason (1995). À medida que a força aplicada é aumentada, um ponto será alcançado onde o material sólido a granel começa a se deformar com as partículas constituintes deslizando umas em relação às outras. É denominado como resistência ao cisalhamento do material o valor limite da tensão de cisalhamento resistiva, quando o material está na condição de deslizamento (Figura 14).

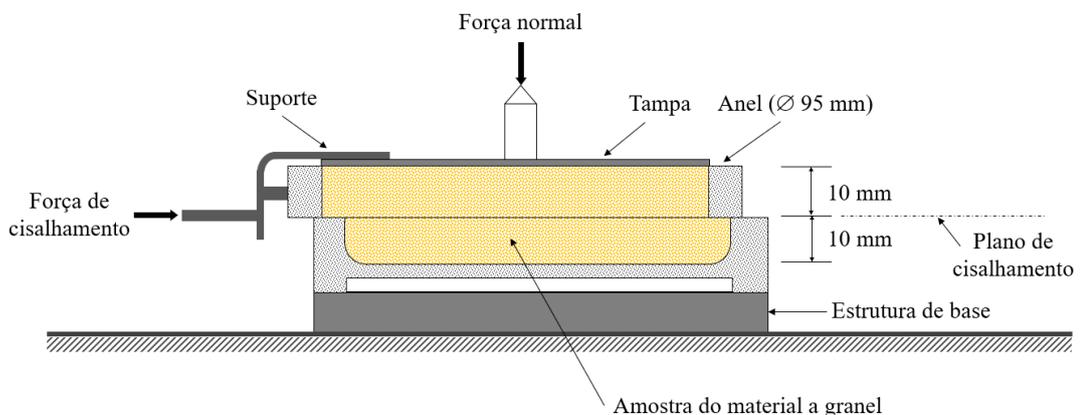
Figura 14. Plano de cisalhamento de uma amostra de material a granel submetido a uma força de compressão.



Fonte: Adaptado de WOODCOCK e MASON (1995)

Atualmente uma das teorias mais aplicadas para determinação das propriedades de fluxo de materiais a granel é a desenvolvida por Jenike e Johanson (Jenike, 1964). A aproximação teórica desse modelo é a de comparar o material a ser manuseado a um solo, com a diferença que uma obra de terra é projetada para nunca escoar, ao passo que, no manuseio de materiais, deve escoar sempre (CHAVES, 2012). As propriedades obtidas são baseadas nos resultados de ensaios de cisalhamento da Mecânica dos Solos, como afirmam Mascarenhas *et al* (2017). Dentre os equipamentos, a célula de Jenike (Figura 15) é o mais aplicado, e pode ser utilizada considerando o atrito entre material-material ou material-parede do equipamento de transporte ou armazenamento. Os ensaios no equipamento são regidos pela norma D6128-97 (ASTM, 1997).

Figura 15. Célula Jenike, tamanho padrão, para ensaios de cisalhamento.



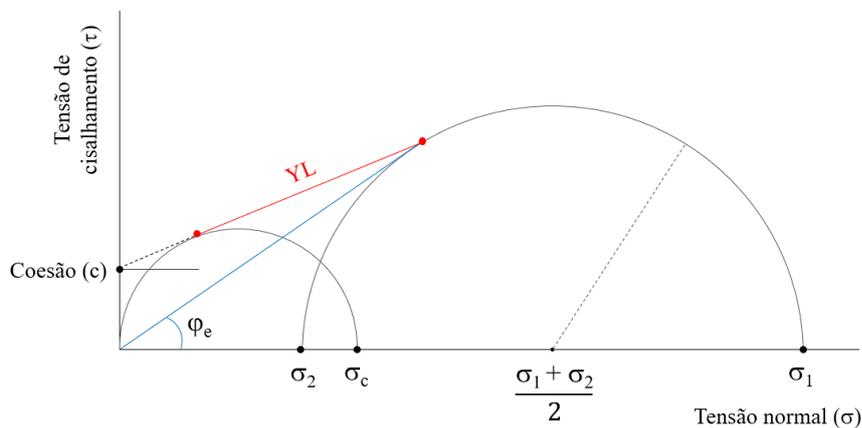
Fonte: Adaptado de WOODCOCK e MASON (1995) e ASTM (1997).

Ruiz, Cabrejos e Mazzinghy (2014) citam que, ao contrário de outros métodos existentes para medir a capacidade de escoamento dos materiais, este método mede tensões médias no

plano de medição, apresenta boa reprodutibilidade, considera as tensões de compressão do material e o efeito de tempo sob consolidação. As principais propriedades de fluxo obtidas a partir dos ensaios de cisalhamento são a função de fluxo (FF), ângulo de atrito interno efetivo (φ_e) e ângulo de atrito material-parede (φ_x). Tais propriedades são importantes no projeto de fluxo em silos (MASCARENHAS *et al*, 2017).

De acordo com Mascarenhas *et al* (2017), na teoria de Jenike, é preciso conhecer as tensões cisalhantes necessárias para iniciar o escoamento. Isso significa identificar a *Yield Locus* (YL) no diagrama tensão cisalhante (τ) versus tensão normal (σ). A YL é a curva tangente que envolve todos os círculos de Mohr que representam o estado de tensões em que o sólido inicia seu escoamento (Figura 16).

Figura 16. Círculo de Mohr.



Fonte: Próprio autor.

O ângulo de atrito interno (ϕ_i) e a coesão (c) contribuem para essa oposição, resultando em dificuldade para o escoamento. Se existe rugosidade entre partículas, essa se soma ao ângulo de atrito (SILVA, 2020). A resistência ao cisalhamento (τ) pode ser determinada pela equação 9:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg}(\phi_i) \quad (9)$$

As principais propriedades de fluxo obtidas a partir dos ensaios de cisalhamento são a função de fluxo (FF), ângulo de atrito interno efetivo (φ_e) e ângulo de atrito material-parede

(ϕ_x). Tais propriedades são importantes no projeto de fluxo em silos (MASCARENHAS et al, 2017).

A função de fluxo (FF) é obtida através da relação entre a tensão de consolidação (σ_1) e a tensão não confinada (σ_c), conforme equação 10.

$$FF = \frac{\sigma_1}{\sigma_c} \quad (10)$$

Schulze (2008) classifica a escoabilidade de um material a granel a partir da função de fluxo. Nesse critério, o escoamento é fácil, quando $FF > 4$, enquanto $FF < 4$ caracteriza o material como coesivo ou muito coesivo (Tabela 5).

Tabela 5. Critérios de escoabilidade a partir da função de fluxo.

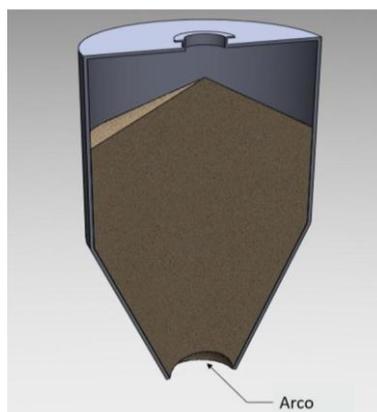
Função de fluxo, FF	Condição de Escoamento
$FF < 1$	Material não esco
$1 < FF < 2$	Material muito coesivo
$2 < FF < 4$	Material coesivo
$4 < FF < 10$	Escoamento fácil
$FF > 10$	Escoamento livre

Fonte: SCHULZE (2008).

3.13 Fenômenos de arqueamento

O arqueamento em um silo ou tremonha pode ser devido ao tamanho das partículas e/ou à natureza coesiva do material, principalmente devido ao seu teor de umidade (CABREJOS, 2017). A formação de arco em silos ou pilhas de estocagem com retomada por baixo, pode causar a interrupção do fluxo pelo represamento de materiais acima da abertura de saída (Figura 17).

Figura 17. Representação gráfica da formação de arco em um silo.



Fonte: Adaptado de JENIKE & JOHANSON (2020).

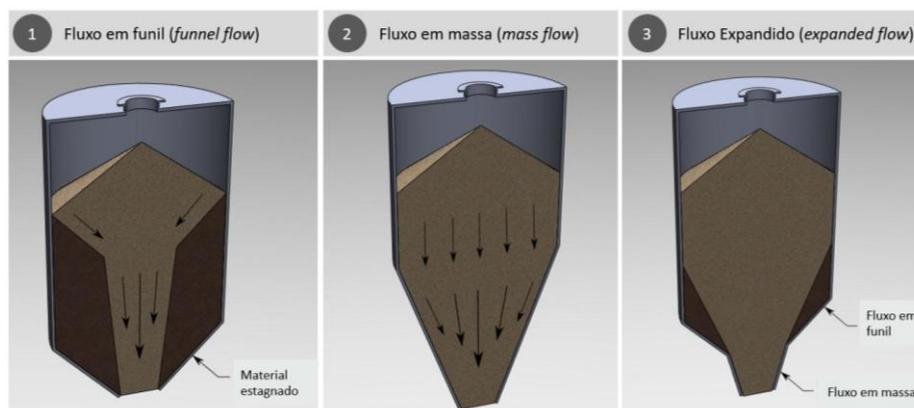
Silva (2005) cita que, para prevenção de arco mecânico a experiência tem mostrado que a dimensão mínima da saída para o fluxo livre deve ser de 8 a 10 vezes o tamanho das maiores partículas alimentadas em silos (REED, 1991 *apud* SILVA, 2005). Por outro lado, para prevenir arcos coesivos, é necessário conhecer as propriedades de atrito e coesão das partículas finas. A medição de propriedades de fluxo, como do ângulo de atrito interno e da coesão, é feita por meio do ensaio de cisalhamento direto da fração fina. Os arcos coesivos podem ser removidos por meio de jatos de água (SILVA, 2005) ou utilizando auxiliares de descarga, como canhões de ar comprimido ou sistema de vibração.

Ruiz, Cabrejos e Mazzinghy (2014) afirmam que um minério britado e estocado em pilhas ou silos pode ganhar resistência coesiva devido às altas pressões de consolidação envolvidas, e a formação de canal ou arcos coesivos durante a descarga pode ocorrer em equipamentos com projeto inadequado. A resistência coesiva de um material para uma dada situação pode ser determinada utilizando a função de fluxo, que mostra a resistência à falha não confinada, como função do esforço principal de consolidação (JENIKE, 1964).

3.14 Padrões de fluxo

Os padrões de fluxo são definidos pela maneira como os materiais fluem no silo e pelos limites entre as regiões de fluxo e sem fluxo, considerando-se a velocidade de fluxo e a geometria do reservatório (SILVA, 2005). Existem três tipos de padrão de fluxo: o fluxo em funil (*funnel flow*), o fluxo em massa (*mass flow*) e o fluxo expandido (*expanded flow*), conforme ilustrado pela Figura 18.

Figura 18. Padrões de fluxo que podem ser desenvolvidos em silos e moegas.



Fonte: Adaptado de JENIKE & JOHANSON (2020).

3.14.1 Fluxo em funil

Ocorre quando a moega não é suficientemente íngreme e lisa para forçar o material a deslizar ao longo das paredes apenas pela gravidade ou quando a boca de saída da moega não é totalmente efetiva. Esse padrão, segundo THOMSON (1997) *apud* SILVA (2005), ocorre em silos de fundo plano ou pouco inclinado ou muito rugoso para permitir que os materiais deslizem ao longo das paredes durante o fluxo. O canal de fluxo usualmente tem a forma de um tronco de cone invertido, com o diâmetro inferior aproximadamente igual à maior dimensão da área ativa da saída.

3.14.2 Fluxo em massa

Ocorre quando uma moega é suficientemente íngreme e lisa para forçar o material a deslizar ao longo das paredes apenas pelo efeito de gravidade. Neste modelo, o material é descarregado de maneira uniforme e não existe material estagnado nas paredes. De acordo com Silva (2005), o canal de fluxo coincide com as paredes do silo e da tremonha, o que é característico de silos em que a altura é maior que uma vez e meia o diâmetro da abertura de saída. Com o silo com fluxo em massa, o primeiro material a entrar é o primeiro a sair.

3.14.3 Fluxo expandido

Também denominado fluxo misto, ocorre quando o fluxo é resultante da combinação de uma tremonha com fluxo em massa sob um silo com fluxo em funil. A tremonha com fluxo em

massa assegura um fluxo controlado, uniforme na saída. O diâmetro superior da tremonha é dimensionado de modo que se minimize a formação de canal estável na porção superior, ou seja, no silo. Esse tipo de fluxo é usado quando se deseja uma descarga uniforme, mas onde as restrições de custo ou espaço excluem um silo com fluxo em massa completo. Esse arranjo pode ser usado para modificar silos com fluxo em funil ou para corrigir problemas de fluxo (SILVA, 2005).

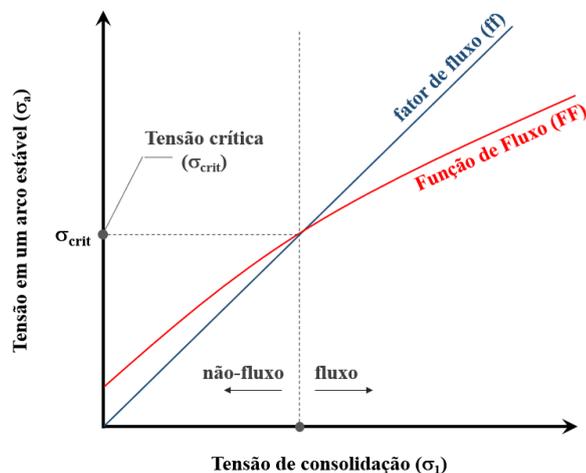
3.15 Diâmetro mínimo para a descarga de silos

A determinação do diâmetro mínimo, também chamado de diâmetro crítico, de uma tremonha para evitar a formação de arco coesivo proposto por Jenike (1964) *apud* Woodcock e Mason (1995), passa primeiro pela determinação do fator de fluxo (ff). De acordo com Mascarenhas *et al* (2017), em um arco estável hipotético, a tensão atuante neste arco é dada por σ_a , então o fator de fluxo é calculado pela equação 11.

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma_a} \quad (11)$$

Woodcock e Mason (1995) mostram que, se o fator de fluxo (ff) e a função de fluxo (FF) forem plotados nos mesmos eixos, conforme mostrado na Figura 19, a condição para a qual o critério “não fluxo” / “fluxo” é satisfeito pode ser observada. Assim, a condição crítica ocorre na interseção das linhas ff e FF. O critério de fluxo é satisfeito em todas as condições para as quais FF está abaixo de ff.

Figura 19. Função de fluxo do sólido a granel (FF) e fator de fluxo da tremonha (ff).



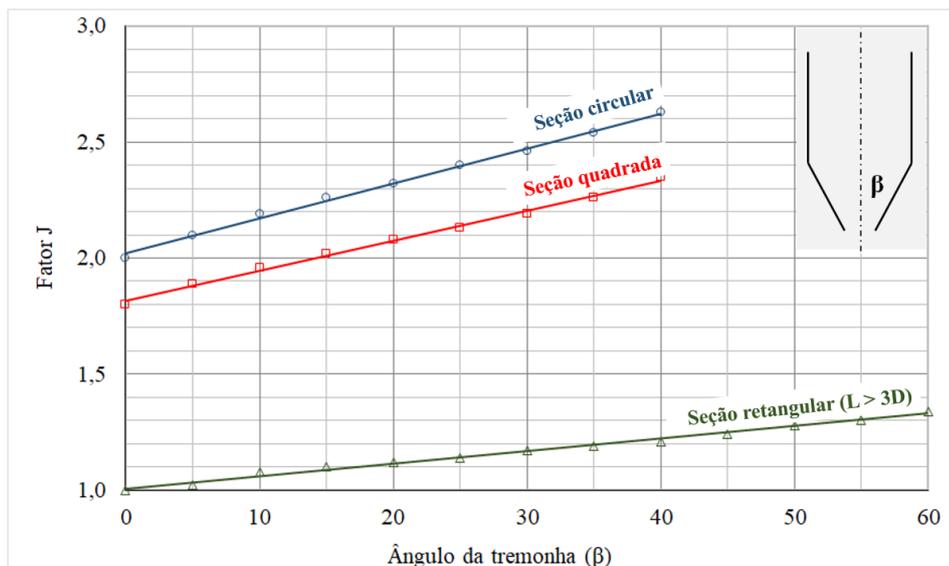
Fonte: Adaptado de WOODCOCK e MASON (1995).

O valor da tensão crítica σ_{crit} , correspondente à interseção dessas duas linhas, pode ser usado para calcular um valor limite da dimensão de saída da tremonha (D_{min}), conforme equação 12.

$$D_{min} = \frac{J \cdot \sigma_{crit}}{\rho_{ap} \cdot g} \quad (12)$$

Onde ρ_{ap} é a massa específica aparente do material armazenado, g é a aceleração da gravidade e J é um fator adimensional empírico, que depende da forma da tremonha e do ângulo da seção convergente (Figura 20).

Figura 20. Fator empírico J em função da forma da tremonha e do ângulo da seção convergente.



Fonte: Adaptado de WOODCOCK e MASON (1995).

Caso a tremonha seja retangular com $L < 3D$, o valor de J deve ser interpolado entre as curvas para as formas quadradas e retangulares. O fator J também pode ser determinado a partir de equações lineares (equações 13, 14 e 15), obtidas por correlação dos valores lidos nas curvas originais apresentadas por Jenike (1964) *apud* Woodcock e Mason (1995), com coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,99.

Tabela 6. Equações lineares para determinação do fator J em função da forma da tremonha e do ângulo da seção convergente.

Tipo de seção	Equação	
Circular	$J = 0,0151\beta + 2,0209$	(13)
Quadrada	$J = 0,0129\beta + 1,8169$	(14)
Retangular ($L > 3D$)	$J = 0,0054\beta + 1,0073$	(15)

Fonte: Próprio autor.

3.16 Auxiliares de descarga

De acordo com Woodcock e Mason (1995), podem ocorrer situações onde as dimensões e geometrias ideais de uma tremonha não são obtidas. Nesses casos pode ser possível superar esses problemas modificando a geometria, por exemplo, encaixando inserções cônicas estacionárias ou fornecendo uma saída de fenda longa. Onde tais abordagens são impraticáveis ou insuficientes, torna-se necessário adotar um artifício para auxiliar o escoamento do material, o chamado “auxiliar de descarga”.

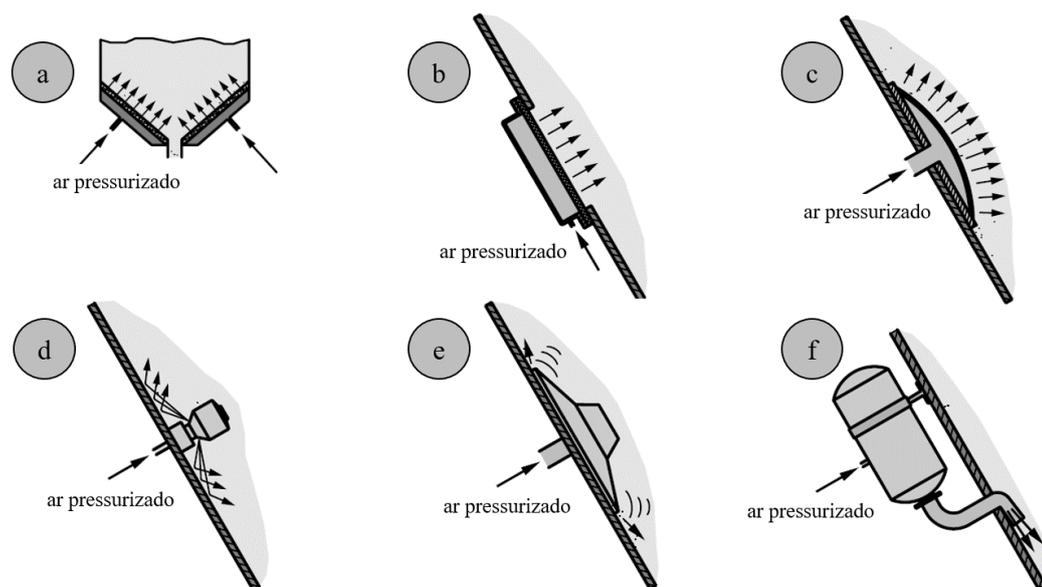
Schulze (2008) classifica os auxiliares de descarga em dois grupos: Auxiliares de descarga pneumática (por exemplo, injeção de ar) e auxiliares de descarga mecânica (por exemplo, vibradores, agitadores e batedores).

3.16.1 Auxiliares de descarga pneumática

Auxiliares de descarga pneumática iniciam o fluxo pela injeção de ar (Figura 21). Nos sistemas denominados tremonha porosa (a), caixa de aeração (b), almofada de aeração (c), bico de aeração (d) e bico vibratório de aeração (e), o ar é injetado continuamente a baixas velocidades de fluxo. Isso pode ser feito com o ar através das paredes da tremonha, feitas de material poroso (Figura 21.a), como também ser através de elementos de aeração (Figura 21.b a Figura 21.e). Tendo uma caixa de aeração simples ou almofadas de aeração, o ar entra no sólido a granel através de um material poroso, por exemplo, tecido ou material sinterizado. Alguns tipos de bicos de aeração sopram o ar paralelo à parede no sólido a granel para ativar uma área maior da parede do silo. O bico vibratório de aeração é fornecido com uma tampa

flexível pressionada contra a parede do silo. O ar flui entre a parede e a tampa para dentro do silo enquanto a tampa é excitada para vibrar, ou seja, o sólido a granel é estimulado por vibração além do fluxo de ar (SCHULZE, 2008).

Figura 21. Auxiliares de descarga pneumática: a. tremonha porosa; b. caixa de aeração; c. almofada de aeração; d. bico de aeração; e. bico vibratório de aeração; f. canhão de ar.



Fonte: Adaptado de SCHULZE (2008).

Schulze (2008) cita ainda, que além da injeção contínua de ar em pequenas taxas de fluxo, existe a possibilidade de liberar impulsivamente o ar comprimido armazenado em um vaso de pressão (volumes de 2 a 500 litros e pressão de até 10 bar) através de um ou mais bicos para dentro do silo. Estes auxiliares de descarga (Figura 21.f) são conhecidos por diferentes nomes comerciais, sendo frequentemente o termo “canhão de ar” mais utilizado.

Como estratégia de funcionamento pode ser apropriado operar os canhões de ar em intervalos regulares (que podem ser desde uma ou duas vezes por dia, até várias vezes por minuto) e em outros, pode ser mais eficaz instalar um sistema automático que aciona o canhão de ar somente se for detectado princípio de obstrução (WOODCOCK e MASON, 1995).

No Brasil a aplicação de canhões de ar (Figura 22) é bastante comum nas diferentes minas em operação, sobretudo na retomada de pilhas pulmão, silos de regularização de fluxo nas etapas de britagem e peneiramento, além de chutes de transferência de produtos oriundos de processamento a umidade natural. Em levantamento recente pelo autor, somente nas operações de minério de ferro das principais mineradoras do estado de Minas Gerais, havia aproximadamente 200 unidades aplicadas.

Figura 22. Canhão de ar aplicado em silo.



Fonte: MARTIN ENGINEERING (2021).

Woodcock e Mason (1995) chamam a atenção para o fato de que esta técnica representa uma abordagem de “força bruta” e, portanto, deve ser usada apenas como último recurso. Além disso, o usuário deve estar ciente de que os dispositivos de expansão de ar podem causar problemas, por exemplo, geração de poeira resultante da quantidade de ar em expansão e tensões excessivas nas paredes da tremonha se o material armazenado não se mover.

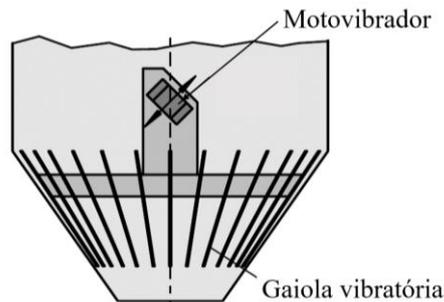
Do ponto de vista de segurança, é recomendável instalar dispositivos para intertravamento do fornecimento de ar para os canhões e do sistema de acionamento, com a abertura das janelas de visitas dos chutes de transferência e com o funcionamento dos demais equipamentos da instalação. Outra recomendação é a restrição do acesso ao local, além da instalação de placas de advertência em vários locais do prédio, alertando sobre os disparos dos canhões de ar.

3.16.2 Auxiliares de descarga mecânica

Os auxiliares de descarga mecânica comercialmente disponíveis geralmente se desenvolveram a partir de práticas primitivas, como bater nas laterais da tremonha ou mexer o material com algum tipo de haste. Desses mecanismos auxiliares, provavelmente a vibração é o meio mais usual na indústria. Dependendo do projeto do dispositivo, a frequência vibracional pode variar de 14 a 1300 Hz, e a amplitude de próximo de zero a mais de 60 mm (WOODCOCK e MASON, 1995).

De acordo com Schulze (2008), alguns dispositivos transferem vibrações para a parede do silo, mas com frequências mais altas. Outros estimulam inserções localizadas dentro do sólido a granel, por exemplo, uma gaiola como mostrado na Figura 23.

Figura 23. Inserto vibratório.



Fonte: Adaptado de SCHULZE (2008).

As vibrações induzidas na parede do silo são mais usuais e ajudam a superar o atrito da parede. Além disso, as vibrações aumentam momentaneamente a tensão no sólido a granel, facilitando o rompimento dos arcos estáveis ou reduzindo a formação de canais (*ratholes*). No entanto, o projeto de dispositivos vibratórios montados diretamente na parede de um silo é difícil, porque as propriedades da estrutura do silo devem ser levadas em consideração (por exemplo, espessura da parede e rigidez), e um funil (cônico) é particularmente rígido perto de sua saída (pequeno raio de curvatura) onde arcos estáveis são predominantemente formados (SCHULZE, 2008). É imperativo que os chutes de transferência e silos sejam seccionados e possuam amortecedores para evitar que a vibração provoque danos à estrutura (Figura 24).

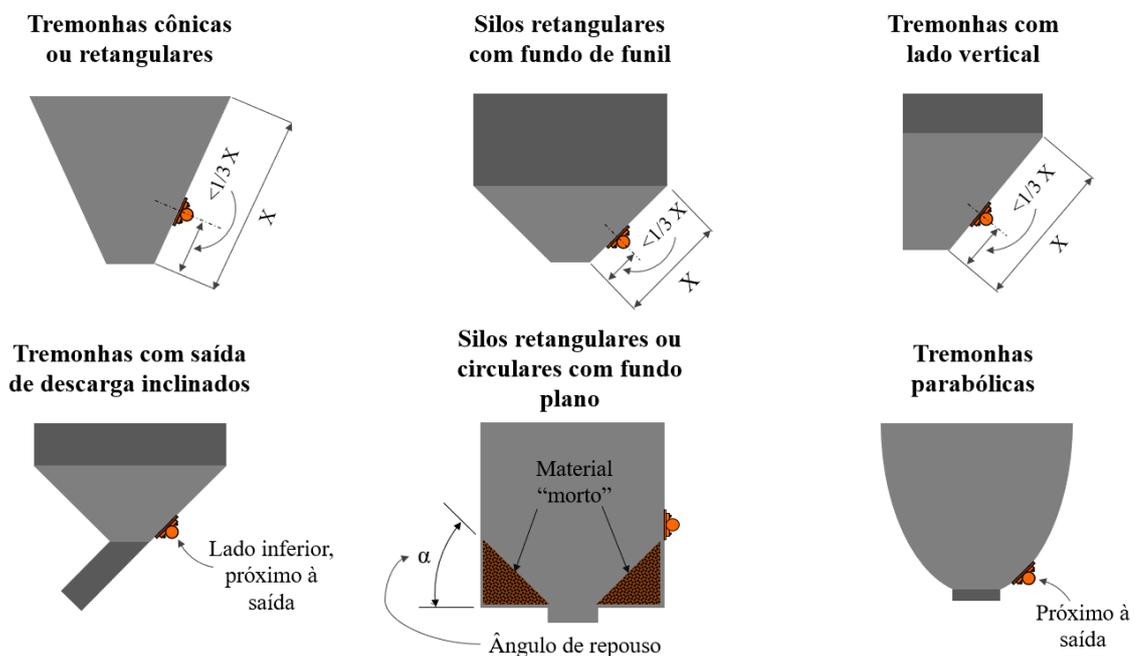
Figura 24. Motovibrador instalado na parede da tremonha.



Fonte: CALFEN (2021).

Woodcock e Mason (1995) citam que a vibração em alta frequência pode causar compactação ou dilatação, dependendo da amplitude e da natureza do produto em questão. O ponto a ser destacado é que, onde a vibração é necessária como um auxílio ao fluxo, ela não deve ser aplicada com a saída da tremonha fechada, pois isso poderia resultar no fortalecimento de qualquer formação de arco. Também é importante que um dispositivo destinado a vibrar as paredes de um silo ou tremonha seja posicionado corretamente para obter o efeito ideal, porém a complexidade da situação impede que um modelamento matemático preveja o ponto ótimo na parede para iniciar uma vibração que se propagará por toda a tremonha. Em geral, o melhor posicionamento dos vibradores é, na prática, encontrado por ensaio físico. Apesar disso, existe uma referência clássica apresentada por Woodcock e Mason (1995), em que a partir da geometria da tremonha ou silo, é possível estimar o ponto para instalação dos vibradores, de modo que a escoabilidade do material será provavelmente próxima da ideal (Figura 25).

Figura 25. Posições recomendadas para instalação de vibradores.



Fonte: Adaptado de WOODCOCK e MASON (1995).

Como um exemplo de aplicação bem sucedida de uso da vibração como auxiliar de descarga, foi desenvolvido e implantado na Mina do Pico, um sistema composto por sensor de nível a laser, isoamortecedores e motovibrador (Figura 26), em um dos chutes críticos do circuito de escoamento para o pátio de produtos, com grande frequência de obstruções. Para o acionamento automático do motovibrador foi implantada lógica no PLC da usina. Após a

implantação, a redução das obstruções do chute foi acima de 80% no período chuvoso (GONÇALVES e BAETA, 2019).

Figura 26. Isoamortecedor e motovibrador aplicado em chute de transferência.

Motovibrador

- Modelo: VBC 1300/36-1400
- Potência: 1.360 W
- Frequência: 60 Hz
- Força centrífuga (F_c): 13.386 N



Isoamortecedor

- Modelo: GPV-855 M
- Amortecimento: Molas helicoidais de aço e amortecimento VISCO® integrado

Fonte: Próprio autor.

Um ponto de atenção, destacado por Schulze (2008), é que todos os dispositivos de promoção de fluxo devem ser usados apenas durante a descarga. A vibração de um sólido a granel estagnado, bem como a ação de agitadores e batedores, ou uma liberação contínua de canhões de ar podem causar consolidação adicional e, assim, aumentar os problemas de fluxo, além do risco de sobrecargas nos equipamentos de manuseio posteriores.

3.17 Modelos físicos

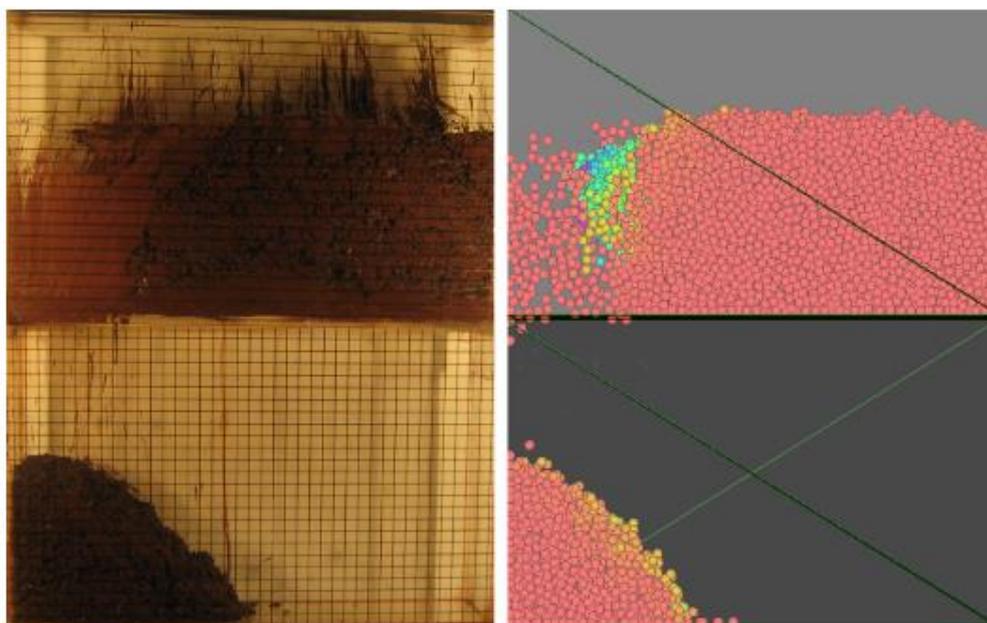
A utilização de modelos físicos para previsão de comportamentos ou resultados tem sido largamente aplicada nos diversos ramos da engenharia, como por exemplo, na determinação da força de arrasto sobre um objeto em um túnel de vento, dimensionamento de embarcações, etc. Fox, McDonald e Pritchard (2006) citam que a partir da utilização desses modelos é possível extrair tendências de dados que, de outra forma, permaneceriam desorganizados e incoerentes, e nem sempre é fácil obter a solução matemática de um problema.

Na Engenharia Mineral, modelos físicos têm sido aplicados para obtenção de parâmetros de calibração de modelos computacionais ou mesmo para obtenção de algum fator para aplicação direta em uma determinada operação.

Durante pesquisa do fluxo de material fragmentado em mineração subterrânea, Silva (2005) utilizou um modelo físico constituído por placas de madeira na estrutura geral e partes das paredes frontais de acrílico para observação do comportamento do fluxo de material, simulando o escoamento de rocha em uma passagem de minério na escala 1:20, a partir das dimensões do corpo de minério da Mina do Baltar.

Mesquita (2014), entre outros pesquisadores, têm aplicado com sucesso a modelagem computacional, pelo Método dos Elementos Discretos (DEM), para simular o escoamento de minérios coesivos em silos e chutes de transferência. Para a calibração desses modelos, além dos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento em célula Jenike, têm sido utilizados modelos físicos do tipo caixa (*box flow*) para correção dos modelos numéricos (Figura 27).

Figura 27. Modelo físico, caixa de fluxo de pequeno porte, e o modelo pelo Método dos Elementos Discretos (DEM) após calibração. Amostra de minério de ferro, *sinter feed*, da Mina de Carajás (PA).



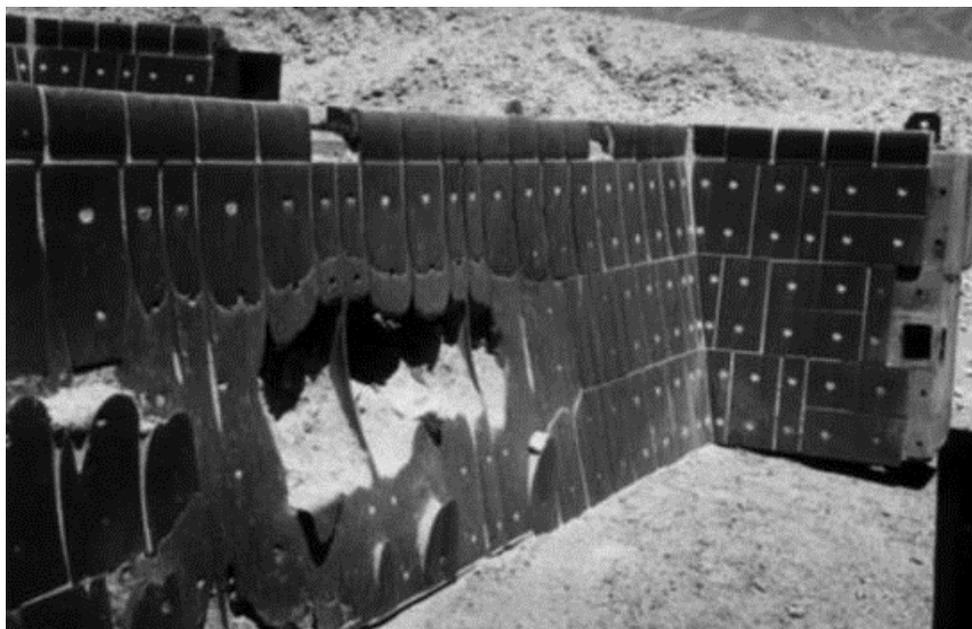
Fonte: Adaptado de MESQUITA (2014).

3.18 Desgaste

O desgaste do revestimento da parede depende do padrão de fluxo desenvolvido. Budinski (1988) *apud* Silva (2016) definiu desgaste como o dano causado às superfícies sólidas, devido

ao movimento relativo entre a referida superfície e o contato com substâncias, normalmente envolvendo uma perda progressiva de material (Figura 28).

Figura 28. Desgaste excessivo dos revestimentos de uma moega acima dos alimentadores.



Fonte: Adaptado de RUIZ, CABREJOS E MAZZINGHY (2014).

No manuseio de minérios a taxa de desgaste é um dos parâmetros para seleção adequada dos revestimentos aplicados em chutes, tremonhas e silos. Enquanto um aço estrutural SAE 1045, por exemplo, possui uma dureza entre 165 e 250 HB, uma partícula de quartzo apresenta dureza equivalente a 750 HB, semelhante às ligas mais duras disponíveis atualmente para aplicação como revestimentos industriais. Conforme citado anteriormente, em geral, quanto mais duras as partículas, mais abrasivo será o produto nos revestimentos (WOODCOCK E MASON, 1995).

Ruiz, Cabrejos e Mazzinghy (2014) citam que o desgaste pode ser medido por ensaios de deslizamento ou de impacto, e os resultados permitem determinar materiais de revestimento mais apropriados para aplicações específicas.

De acordo com Silva (2016) a abrasão é um dos modos de desgaste que ocorrem com maior frequência nos ambientes industriais e, provavelmente, um dos mais estudados. A abrasão consiste no desgaste produzido por partículas duras ou protuberâncias forçadas contra uma superfície sólida em movimento relativo, ou seja, o desgaste produzido por irregularidades de uma superfície quando um corpo sólido se move ao longo de outra superfície sólida (BUDINSKI, 1988 *apud* SILVA, 2016).

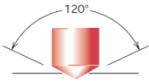
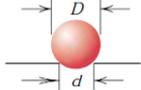
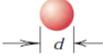
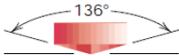
3.18.1 Dureza dos materiais metálicos

A dureza dos materiais metálicos é uma medida da resistência à deformação plástica local (por exemplo, uma pequena impressão ou um risco). Ao longo dos anos foram desenvolvidas técnicas de dureza quantitativas, nas quais um pequeno penetrador é forçado contra a superfície do material a ser testado, sob condições controladas de carga e de taxa de aplicação (Tabela 7). A profundidade ou o tamanho da impressão resultante é medida, a qual, por sua vez é relacionada a um número de dureza; quanto mais macio o material, tanto maior e mais profunda será a impressão e menor será o índice de dureza (CALLISTER JR, 2008).

Callister Jr (2008) destaca que os ensaios de dureza são realizados mais frequentemente do que qualquer outro ensaio mecânico, por diversas razões:

- Eles são simples e de baixo custo;
- O ensaio não é destrutivo;
- Outras propriedades mecânicas podem, com frequência, ser estimadas a partir dos dados de dureza;

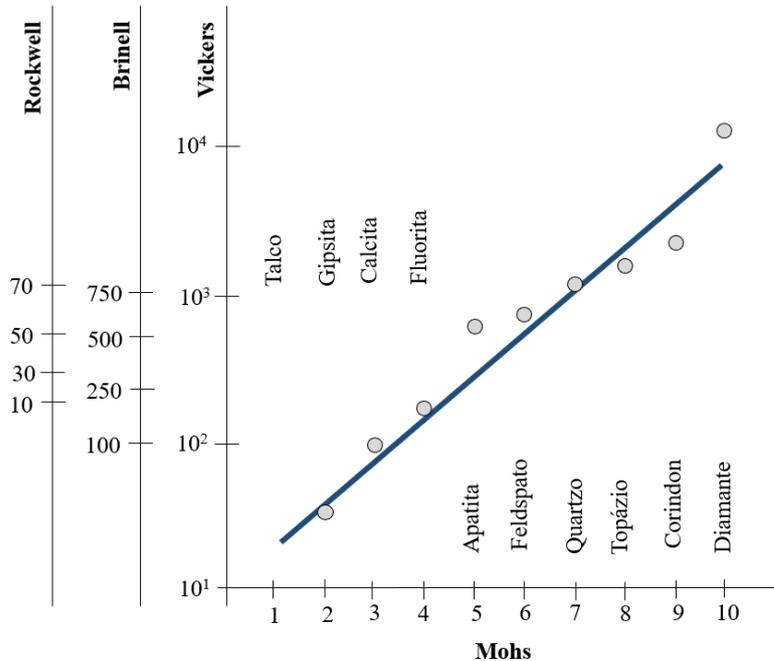
Tabela 7. Técnicas de ensaio de dureza para materiais metálicos.

Ensaio	Penetrador	Forma de impressão		Fórmula para o número de dureza
		Vista lateral	Vista superior	
Rockwell e Rockwell superficial	Cone de diamante; esferas de aço com diâmetros $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ polegadas			60 kg
				100 kg
				150 kg
				15 kg
				30 kg
			45 kg	
Brinell	Esfera de aço de 10 mm ou carbeto de tungstênio			$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Microdureza Vickers	Pirâmide de diamante			$HV = 1.854P/d_1^2$

Fonte: Adaptado de CALLISTER JR (2008).

A relação entre as diferentes escalas de durezas (Rockwell, Brinell ou Vickers) aplicadas aos materiais, e a escala de dureza Mohs dos minerais é apresentada na Figura 29.

Figura 29. Relação entre a escala de dureza de Mohs e as escalas Rockwell, Brinell e Vickers.



Fonte: Adaptado de WOODCOCK e MASON (1995).

3.19 Revestimentos

A utilização de revestimentos consiste na aplicação de materiais metálicos ou compósitos, com características adequadas para aumentar a resistência à abrasão, ao impacto ou a ambos. Os revestimentos também podem ser aplicados com objetivo de proporcionar uma característica antiaderente, no caso de manuseio de materiais coesivos, como minério de ferro e bauxita, por exemplo. Cabe destacar, que dificilmente um determinado material apresentará duas propriedades simultaneamente, e, portanto, é necessário aplicar o material ou combinação de materiais que melhor atendam ao processo a que se destinam.

Silva (2016) cita que as soluções atualmente disponíveis passam pelas ligas de aço com médio e alto teor de carbono, tratados termicamente com vistas a um aumento da dureza de determinados constituintes, e demais aços ligados, cujos elementos de liga principais na composição de ligas resistentes ao desgaste são o cromo (Cr), o níquel (Ni) e o Molibdênio (Mo). Outra opção encontrada no mercado para a redução do desgaste de peças metálicas é o revestimento com materiais de origem polimérica, como UHMW (*ultra high molecular*

weight), polímero de engenharia com propriedades excepcionais e muito particulares, como a resistência ao desgaste por abrasão e resistência ao impacto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

3.19.1 CDP

CDP são placas de aço-carbono ASTM A-36 com revestimento soldado, desenvolvido pela Eutectic Castolin. Comercialmente conhecidas como CDP, sigla de *CastoDur Diamond Plate*®, as placas de aço-carbono são revestidas com carbonetos do tipo carbonetos de cromo, de titânio ou vários outros elementos, como boro, vanádio, tungstênio, etc. Tem dureza 425 a 475 HB. Principais aplicações: caçamba de caminhões e de escavadeiras, lâminas de penetração de solo, chutes de transferência, peneiras, tubulações e placas de britadores (SILVA, 2016 e EUTECTIC CASTOLIN, 2020).

3.19.2 Hardox

O aço Hardox foi desenvolvido na década de 1970 pela siderúrgica sueca SSAB, sendo continuamente aprimorado desde então. Esse aço apresenta combinação consistente entre alta dureza, elevada resistência mecânica e excelente resistência ao impacto. Apresenta dureza 370 a 430 HB para o Hardox 400, 425 a 475 HB para o Hardox 450 e 470 a 530 HB para o Hardox 500. Composição típica (%) para o aço Hardox 400: $C_{(max)} = 0,32$; $Si_{(max)} = 0,70$; $Mn_{(max)} = 1,60$; $P_{(max)} = 0,025$; $S_{(max)} = 0,010$; $Cr_{(max)} = 2,50$; $Ni_{(max)} = 1,50$; $Mo_{(max)} = 0,60$ e $B_{(max)} = 0,004$ (SSAB, 2020). Suas principais aplicações são: caçamba de caminhões e de escavadeiras, lâminas de penetração de solo, chutes de transferência, peneiras, módulos para grelhas vibratórias e placas de britadores (SSAB, 2020).

3.19.3 Arcoplate

É um revestimento antidesgaste, de baixo coeficiente de atrito, desenvolvido pela Martin Engineering. Fabricado a partir de uma tecnologia que funde o revestimento em uma chapa base feita de aço-carbono. Apresenta resistência ao desgaste causado por abrasão extrema ou impacto, elimina entupimentos (quando aplicado o acabamento polido), com ou sem a presença de altas temperaturas. Composição típica (%): C = 4,0 a 5,0; Si = 0,5 a 1,0; Mn = 0,7 a 1,1; Cr

= 35,0 a 40,0. Principais aplicações: lâminas de penetração de solo, chutes de transferência, módulos para grelhas vibratórias e tubulações (MARTIN ENGINEERING, 2020).

3.19.4 Aço-manganês

O aço-manganês, também conhecido como *Hadfield* aço, é uma liga de aço e de manganês, que possui alta resistência ao impacto. Geralmente apresentam 1,2 % de carbono e 12 a 13 % de manganês, conforme norma ASTM-A 128. A utilização desse material em peças submetidas ao desgaste deve-se a duas propriedades: endurecimento superficial mediante realização de trabalho (encruamento) e tenacidade. O encruamento que se verifica no aço-manganês pode elevar a sua dureza de cerca de 200 HB (Brinell) para cerca de 500 a 600 HB (INFOMET, 2020). Principais aplicações: Mandíbulas e cunhas para britadores, mantos e revestimentos para britadores cônicos/giratórios, barras para britadores de impacto, placas de revestimento de chutes de transferência.

3.19.5 Cerâmica

As placas de revestimento de material cerâmico são confeccionadas geralmente em alumina, acima de 90 % em massa (KALENBORN, 2020). Os materiais cerâmicos são frágeis e sua resistência à tração é baixa, raramente ultrapassando 166 MPa. Sua resistência à compressão é, contudo, muito elevada, 5 a 10 vezes maior que sua resistência à tração. Devido a sua fragilidade, não apresentam ductilidade e, por isso mesmo, sua resistência ao choque é baixa. Como são muito duros (9,0 na escala de Mohs, para óxido de alumínio, por exemplo), são úteis para peças resistentes ao desgaste por abrasão. Todos os materiais cerâmicos possuem excelente resistência à ação de agentes químicos (CHIAVERINI, 1986). Principais aplicações: revestimento para silos, chutes de transferência, tubulações e componentes de hidrociclones.

3.19.6 Polietileno de ultra-alta massa molecular (UHMW)

Simbologia internacional oriunda da expressão em inglês *ultra high molecular weight polyethylene*, polímero sintético composto de cadeias parafínicas, lineares ou ramificadas, cuja massa molecular média típica é de aproximadamente $4,0 \times 10^6$ g/mol (CALLISTER JR, 2008). Tal massa molecular confere ao UHMW propriedades tão superiores e distintas das propriedades de um polietileno convencional, como, por exemplo, PEAD (HDPE) ou PEAD-

APM (HMW-PE, PE-500), que o classificam como um plástico de engenharia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Propriedades típicas: coeficiente de atrito muito baixo, superfície autolubrificante e não aderente, massa molecular $3,0$ a $8,0 \times 10^6$ g/mol, massa específica de 925 kg/m³, dureza 64 Shore D. Principais aplicações: peças técnicas, placas moldadas, revestimentos de caçamba de caminhões, lâminas de trator, silos e chutes de transferência (BRASKEN, 2020).

Gonçalves e Baeta (2019) aplicaram UHMW nos chutes de *undersize* das peneiras de classificação em 19,0 mm em uma das usinas de processamento de minério de ferro a umidade natural da mina do Pico, e após 30 dias de operação contínua à uma taxa de 400 t/h e umidade média de 11,9%, não foi observado acúmulo significativo de material na superfície do revestimento (Figura 30).

Figura 30. Revestimento UHMW aplicado em chute de *undersize* após 30 dias de operação.



Fonte: Próprio autor.

3.19.7 Poliuretano

Classe de polímeros que tem encontrado aplicações em áreas distintas, como medicina, setores automobilísticos e industriais. Os poliuretanos são uma importante classe de polímeros termoplásticos e termorrígidos devido suas propriedades mecânicas, térmicas e químicas, que podem ser definidas através da seleção adequada de uma ampla variedade de matérias primas (FIORIO, 2011). Propriedades típicas: massa molecular variável, massa específica de 1.200 a 1300 kg/m³, boa resistência à abrasão, facilidade de fabricação de peças de grandes dimensões e formas e menor custo de processamento. Principais aplicações como termoplástico: peças

técnicas, gaxetas, telas de peneiras, tubulações, anéis de vedação, juntas para trilhos e componentes de hidrociclones (MANO, 1991).

3.19.8 Borracha

A borracha natural é um polímero de poli(cis-1,4-isopreno) e apresenta propriedades únicas devido a sua estrutura intrínseca, alta massa molar e presença de outros componentes minoritários como proteínas, carboidratos, lipídios e minerais presentes no látex. Cerca de 2500 plantas produzem látex, mas o látex da *Hevea brasiliensis* se constitui na única fonte comercial importante de látex de borracha natural (VAN BEILEN, 2007 *apud* RIPPEL e BRAGANÇA, 2009).

As borrachas sintéticas são derivadas de petróleo e possuem quase a mesma composição química da borracha natural e as suas propriedades físicas são adequadas a alguns manufaturados, porém são inferiores para algumas aplicações como pneus de automóveis, caminhões, aviões e revestimentos diversos (IAC, 2009 *apud* RIPPEL e BRAGANÇA, 2009).

De acordo com Crawford (1998) as borrachas convencionais são membros da família dos polímeros, pois consistem em moléculas semelhantes a cadeias longas. Essas correntes são enroladas e torcidas de maneira aleatória e têm flexibilidade suficiente para permitir que o material sofra deformações muito grandes. No estado “verde”, a borracha não seria capaz de se recuperar totalmente de grandes deformações porque as moléculas teriam passado por deslizamentos irreversíveis umas sobre as outras. Para evitar esse deslizamento, as moléculas são ancoradas por um processo de formação de ligações cruzadas, chamado de vulcanização, e é realizado por uma reação química irreversível, conduzida normalmente em uma temperatura elevada.

Na maioria das reações de vulcanização, compostos à base de enxofre são adicionados ao elastômero aquecido (CALLISTER JR, 2008). Assim, as moléculas são reticuladas de maneira semelhante à que ocorre nos termofixos. Esta ligação não diminui a disposição aleatória das moléculas nem a sua natureza enrolada e torcida de modo que, quando a borracha é deformada, as moléculas se esticam e desenrolam, mas não deslizam. Dessa forma, quando a força aplicada é removida, a borracha volta à sua forma original.

As borrachas vulcanizadas possuem uma gama de propriedades muito desejáveis, como resiliência, resistência a óleos, graxas e ozônio, flexibilidade a baixas temperaturas e resistência a muitos ácidos e bases. Principais aplicações: fabricação de pneus, telas de peneiras, mangotes, revestimento de tanques, caixas de bomba de polpa, tubulações e componentes de

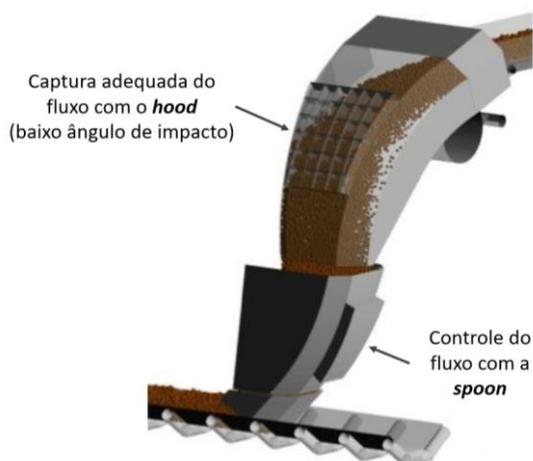
hidrociclones, amortecedores (coxins), etc. Além disso, desde 1994 têm sido desenvolvidas e fabricadas placas de revestimento para chutes de transferência, a partir do reaproveitamento de sucata de pneus de equipamentos fora-de-estrada (RUBBERBRAS, 2020).

3.20 Chutes de transferência

Chutes de transferência são normalmente empregados em sistemas de transporte por correia ao transferir material sólido a granel de um transportador de correia para outro ou, alternativamente, descarregar em recipientes de armazenamento, incluindo silos, caixas ou porões de navio. Eles são usados para capturar, guiar e acelerar granéis até a velocidade da correia, como no caso de redirecionar o fluxo de material de movimento lento de uma peneira, tremonha ou alimentador para uma correia de recepção de deslocamento rápido. Os parâmetros para seu projeto conceitual são baseados na manutenção de um fluxo em movimento rápido, caracterizado por condições de fluxo acelerado. Para este tipo de fluxo dentro da transferência, a abordagem de análise contínua é normalmente aplicada (ILIC, 2014).

Ruiz (2016) cita que para materiais rochosos de fluxo livre, é aconselhável a adoção de caixas de pedra (*stone box*) e nervuras, com objetivo de minimizar o desgaste. Não é recomendado destinar muita área para as caixas de pedra, pois além do aumento de peso da estrutura, compromete a execução de limpeza dos vários tipos de materiais (GAVI, 2001). Por outro lado, no caso de materiais finos e aderentes, a utilização de sistema *hood & spoon* (Figura 31) e ausência de nervuras, tendem a evitar entupimento e minimizar acúmulo de material no chute (RUIZ, 2016).

Figura 31. Projeto de sistema *hood & spoon* desenvolvido pela Jenike & Johanson.



Fonte: Adaptado de RUIZ (2016).

Os princípios que norteiam os projetos de chutes de transferência são: manter área de seção transversal suficiente, evitar entupimento nos pontos de impacto, controlar a corrente de fluxo das partículas e minimizar o desgaste das superfícies (RUIZ, 2016).

De acordo com Gavi (2001), em relação à largura do chute de carregamento (saída do chute), esta não deve ser superior a 2/3 da largura da correia de recebimento. Quando o material tiver rochas de até 12", a largura interna do chute de carregamento deve ser de pelo menos 2,5 a 3 vezes a maior dimensão da partícula do material.

3.20.1 Técnicas de modelagem de chutes de transferência

De acordo com Ilic (2014), a caracterização do material e a determinação dos parâmetros de fluxo constituem a base fundamental para a implementação da análise de fluxo contínuo em chute. Consiste em realizar ensaios padronizados e bem estabelecidos, como: características de compressibilidade, ângulo de repouso, distribuição de tamanho de partícula, atrito interno e resistência interna (função de fluxo). As propriedades obtidas a partir desses ensaios são diretamente aplicáveis a análise contínua. Elas são macroscópicas por natureza e incluem densidade aparente, ângulo de atrito da parede e ângulo de atrito interno.

Ruiz (2016) recomenda calcular a aceleração e velocidade para determinar a capacidade, não utilizar convergência (redução da seção transversal) e efetuar o dimensionamento considerando ocupar no máximo 1/3 da seção transversal do chute. A capacidade de escoamento em um chute pode ser calculada pela equação 16.

$$Q = \frac{1}{3} \cdot V \cdot A \quad (16)$$

Onde:

Q — Vazão volumétrica; V — Velocidade e A — Área da seção transversal do chute.

Em um chute reto, a velocidade de escoamento final obedece à equação de Torricelli ($V^2 = V_0^2 + 2 \cdot a \cdot s$) para o momento uniformemente variado. Assumindo atrito equivalente constante, μE , a velocidade, V , do fluxo de material a uma distância, s , descendo a inclinação é determinada pela equação 17 (ROBERTS, 2001 *apud* ILIC & HICKS, 2016).

$$V = \sqrt{V_0^2 + 2 \cdot a \cdot s} \quad (17)$$

Onde:

V — Velocidade final; V_0 — Velocidade inicial; a — Aceleração e s — Distância percorrida.

A aceleração do fluxo pode ser calculada pela equação 18 (ROBERTS, 2001 *apud* ILIC & HICKS, 2016).

$$a = g \cdot (\cos \theta - \mu E \cdot \sin \theta) \quad (18)$$

Onde:

θ — Inclinação do chute a partir da vertical; μE — Para fluxos de cisalhamento interno, exibidos com chutes do tipo caixa de rocha, μE está relacionado ao ângulo efetivo de atrito interno, ϕ_i , do material a granel manuseado por meio de $\mu E = \sin \phi_i$; enquanto, que para chutes com camisas lisas μE está relacionado ao ângulo de atrito com a parede, ϕ_x , através de $\mu E = \tan \phi_x$.

Considerando o manuseio de minérios coesivos, onde deve-se evitar a utilização de caixas de pedra (*stone box*) e nervuras nos chutes de transferência, a equação 18 pode ser adaptada, para a equação 19.

$$a = g \cdot (\cos \theta - \tan \phi_x \cdot \sin \theta) \quad (19)$$

Na seção de queda livre da transferência, desconsiderando a resistência do ar, a velocidade do fluxo de material (V) em uma altura de queda, h , é aproximadamente determinada pela equação 20:

$$V = \sqrt{V_0^2 + 2 \cdot g \cdot h} \quad (20)$$

Onde:

g — Aceleração da gravidade e h — Altura de queda;

A pressão de impacto, no carregamento P_i , é dada pela equação 21 (RUIZ, 2016).

$$P_i = \rho_{ap} \cdot V_i^2 \cdot \sin^2 \theta_i \quad (21)$$

Onde:

ρ_{ap} — Densidade aparente do material; V_i — Velocidade de impacto e θ_i — Ângulo de impacto.

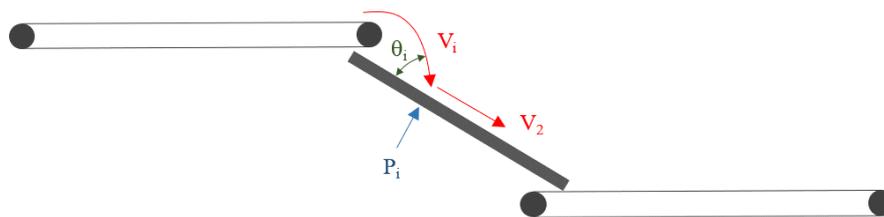
A velocidade ao longo do chute após o impacto, representada pela Figura 32, pode ser calculada pela equação 22 (RUIZ, 2016).

$$V_2 = V_i \cdot (\cos \theta_i - \sin \theta_i \cdot \tan \varphi_x) \quad (22)$$

Onde:

V_2 — Velocidade ao longo do chute após o impacto; V_i — Velocidade de impacto; θ_i — Ângulo de impacto e φ_x — Ângulo de atrito com a parede.

Figura 32. Representação gráfica do ângulo de impacto (θ_i), velocidades de impacto (V_i) e velocidade ao longo do chute após o impacto (V_2).



Fonte: Adaptado de RUIZ (2016).

Ruiz (2016) cita que, se $\theta_i + \varphi_x = 90^\circ$, não há velocidade resultante, e, portanto, o projeto do chute precisa ser revisto.

O parâmetro de desgaste da correia, W_a , que expressa a taxa de desgaste abrasivo na correia pode ser estabelecido pela equação 22 (ROBERTS, 2001 *apud* ILIC E HICKS, 2016).

$$W_a = \mu_1 \cdot \rho \cdot V_N^2 \cdot (V_B - V_L) \quad (22)$$

Onde:

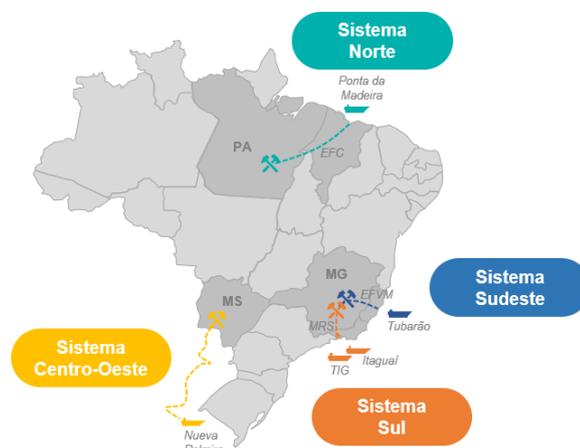
μ_l — coeficiente de atrito entre o material a granel e a correia transportadora; V_B — velocidade da correia e V_L — velocidade de carregamento do material a granel na direção do curso de saída da correia.

Ilic e Hicks (2016) destacam que os chutes desenvolvidos para minério de ferro, geralmente, são especificados por regras práticas desenvolvidas por meio de experiência anterior e altamente influenciadas por restrições geométricas, como ângulo acentuado de inclinação da ordem de 70° . O efeito desse tipo de especificação pode resultar em alto desgaste do chute e da correia, o que tende a reduzir significativamente sua vida útil.

3.21 Mina do Pico

A Mina do Pico é uma unidade operacional da Vale S/A, localizada no município de Itabirito, Minas Gerais. Atualmente está ligada ao Complexo minerador de Vargem Grande, dentro do Sistema Sul (Figura 33). A unidade possui três minas: Galinheiro, Sapecado e Pico (exaurida) e quatro usinas: ITM-A, ITM-B, ITM-D e ITM-I, sendo que a ITM-I opera à unidade natural desde 2017. Toda a produção do site é enviada por transportador de correia de longa distância (TCLD) até o Terminal Ferroviário de Andaime (TFA), de onde os produtos seguem para os portos de Itaguaí ou Guaíba, no Rio de Janeiro, através da ferrovia operada pela MRS Logística.

Figura 33. Sistemas de produção de minério de ferro da Vale no Brasil.



Fonte: VALE (2020).

3.21.1 Contextualização histórica

A atividade industrial de exploração de minério de ferro da Mina do Pico teve início na década de 1940, quando do desenvolvimento do parque siderúrgico no Brasil com a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), e em Itabirito, com a Siderúrgica Queiroz Júnior. A lavra do minério de ferro em torno do Pico de Itabirito ocorreu de forma intermitente de 1943 a 1961, arrendadas à Sociedade Indústria e Comércio de Minério Ltda (SICOM) de Augusto Trajano de Azevedo Antunes. Em 1948, a partir da SICOM, foi criada a Indústria e Comércio de Minérios (ICOMI), posteriormente renomeada como ICOMINAS. Em 1950, foi criada a *holding* Companhia Auxiliar de Empresas de Mineração (CAEMI) e em associação com a empresa americana Hanna Mining Co., a ICOMINAS foi reestruturada como Minerações Brasileiras Reunidas (MBR), que detém até hoje os direitos minerários da área (ROSIÈRE, *et al*, 2005).

No início dos anos 2000, a Vale, então Companhia Vale do Rio Doce, recentemente privatizada, iniciou um programa de expansão baseado em aquisições de mineradoras de grande porte no estado de Minas Gerais. Dessa forma, em 2001 houve a aquisição conjunta com a Mitsui & Co. Ltd. do controle acionário (50%/50%) da CAEMI. Em 2003, a Vale comprou as ações da Mitsui e assumiu o controle total da Caemi e passou a deter 89,8% da MBR. Mais tarde, em 2007, a Vale assinou um acordo com o grupo de acionistas japoneses, minoritários da MBR, assumindo 100% do capital da empresa pelos próximos 30 anos. Esse acordo permitiu explorar as sinergias derivadas da operação de minas, plantas e terminais marítimos, eliminação de redundâncias e compartilhamento de melhores práticas (VALE, 2007).

No ano de 2007 a Vale incorporou a MBR, e a Mina do Pico passou a ser uma das unidades operacionais ligadas ao Sistema Sul da Vale, com um aporte de produção da ordem de 20 milhões de toneladas por ano de produtos gerados a partir de tratamento de minério à úmido, com concentração por separação magnética e flotação, e também operações à umidade natural, que vem aumentando a participação na produção total do site nos últimos anos.

3.21.2 Mina de Galinheiro

A Mina de Galinheiro está situada cerca de 4 km ao norte da Mina do Pico, com extensão aproximada de 500 metros de comprimento e 350 metros de largura, composta por lentes de hematitas compactas com espessura variando de centímetros a 50 metros. Apresenta dois

sistemas de fraturas, geralmente preenchidos por argilo-minerais supergênicos, como gibbsita, goethita e caulinita. Na lavra de meia-encosta predominam hematitas e itabiritos associados à canga e altos teores de fósforo e alumina. Secundariamente ocorrem lentes métricas de hematitas médias e macias gradacionais para itabiritos ricos. Os itabiritos friáveis têm alta variação de sílica (10 a 50 %), predominando quartzo livre, pouco associado à hematita, ocorrendo como partículas mistas nos itabiritos com consistência média (FERNANDES, 2003).

3.21.3 Mina de Sapecado

A Mina de Sapecado está situada imediatamente ao sul da Mina do Pico, apresentando as mesmas litologias, com uma área de lavra de 2000 metros de comprimento e 500 metros de largura. Composta por lentes de hematitas compactas, localizadas na porção leste e sul da Mina, com espessura variando de 10 a 70 metros, intercaladas a hematitas médias e macias e itabiritos friáveis, médios e compactos. As lentes de hematitas médias e macias são sempre gradacionais para itabiritos ricos. Na porção mais a oeste da Mina, os itabiritos e hematitas estão enriquecidos em manganês, com afinidade carbonática. Os teores médios de sílica e a consistência dos itabiritos são muito variáveis, sendo a sílica situada entre 10 e 55 %. Próximo à superfície, aumentam os teores de fósforo e alumina (FERNANDES, 2003).

3.21.4 Processamento à umidade natural

O tratamento de minérios sob umidade natural na Mina do Pico em larga escala iniciou-se em março de 2017, quando uma das principais usinas do site, a ITM-I (Figura 34), foi adaptada para processar 1600 t/h de ROM, gerando um *coarse sinter feed* abaixo de 19,0 mm.

Figura 34. Instalação de tratamento de minério I (ITM-I) adaptada para processamento à umidade natural.

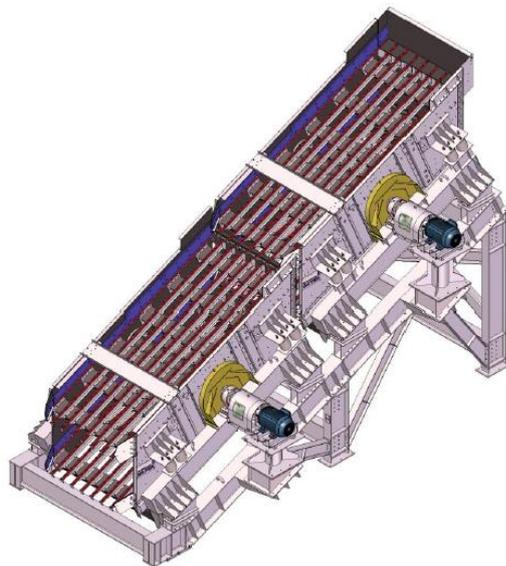


Fonte: Próprio autor.

A viabilidade técnica desta alternativa surgiu, em 2015, quando a Vale lançou o *Brazilian Blend Fines* (BRBF), produto resultante da mistura de finos de minério de ferro de alto teor das minas de Carajás, Pará, com finos de minério de ferro produzidos em Minas Gerais, que se complementam em termos de características físicas, químicas e metalúrgicas. O BRBF é produzido no Terminal Marítimo de Teluk Rubiah na Malásia e em dezessete portos na China. Esse processo reduziu o tempo necessário para atendimento dos mercados asiáticos e aumentou a capilaridade de distribuição ao permitir o uso de embarcações menores (VALE, 2020).

O minério disponível nas minas de Galinheiro e Sapecado possui grande quantidade de materiais hidratados, o que tornou a operação à umidade natural um desafio à parte. Para adaptação da ITM-I, o circuito original de britagem primária, peneiramento primário e britagem secundária foram modificados, com substituição de quatro peneiras Metso BS 8'x 21' DD por modelos Haver TD 8' x 24', com aceleração podendo chegar a 5G (Figura 35), mudança de *layout* de chutes e conexão desse circuito ao pátio de produtos. O restante da usina, envolvendo o circuito de classificação e concentração, foi paralisado.

Figura 35. Desenho 3D da peneira Haver TD 8' x 24'.



Fonte: HAVER & BOECKER (2016)

Para possibilitar o peneiramento, garantindo o atendimento à especificação de 0,0% retido na malha 19,0 mm, foi desenvolvida junto à Haver & Boecker uma tela em poliuretano autolimpante (Figura 36), denominada comercialmente por Ty-Deck Ultra, onde foi possível obter uma área aberta de 44%, contra 33% de uma tela convencional em aço, na mesma

abertura. Esta solução ajudou a viabilizar a operação da usina, sobretudo no período chuvoso, quando ocorrem reduções significativas da taxa de alimentação por baixa eficiência de peneiramento.

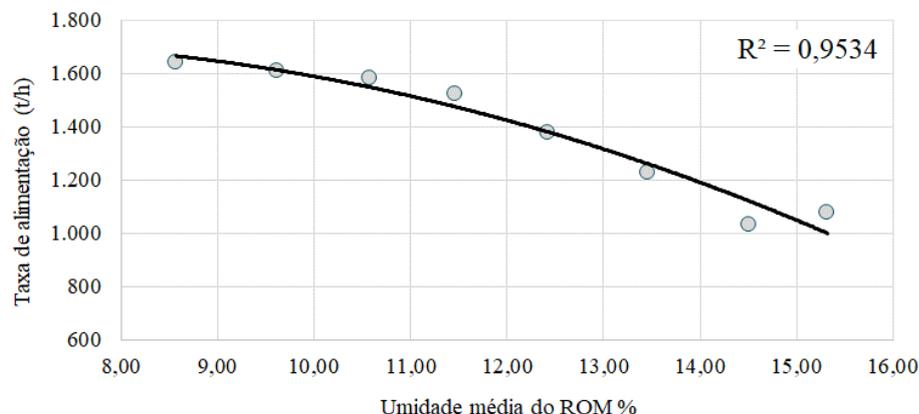
Figura 36. Tela em poliuretano autolimpante, abertura 19,0 mm.



Fonte: Próprio autor.

A taxa de alimentação da usina mostrou-se totalmente dependente da umidade do ROM, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9534 (Figura 37). Maiores teores de umidade reduzem a eficiência de peneiramento, que contribui para o arraste de finos para o *oversize* e aumento da carga circulante, podendo inclusive gerar travamento do circuito por falta de “espaço” para admitir alimentação nova (GONÇALVES e BAETA, 2019).

Figura 37. Influência da umidade sobre a taxa de alimentação da ITM-I da Mina do Pico.

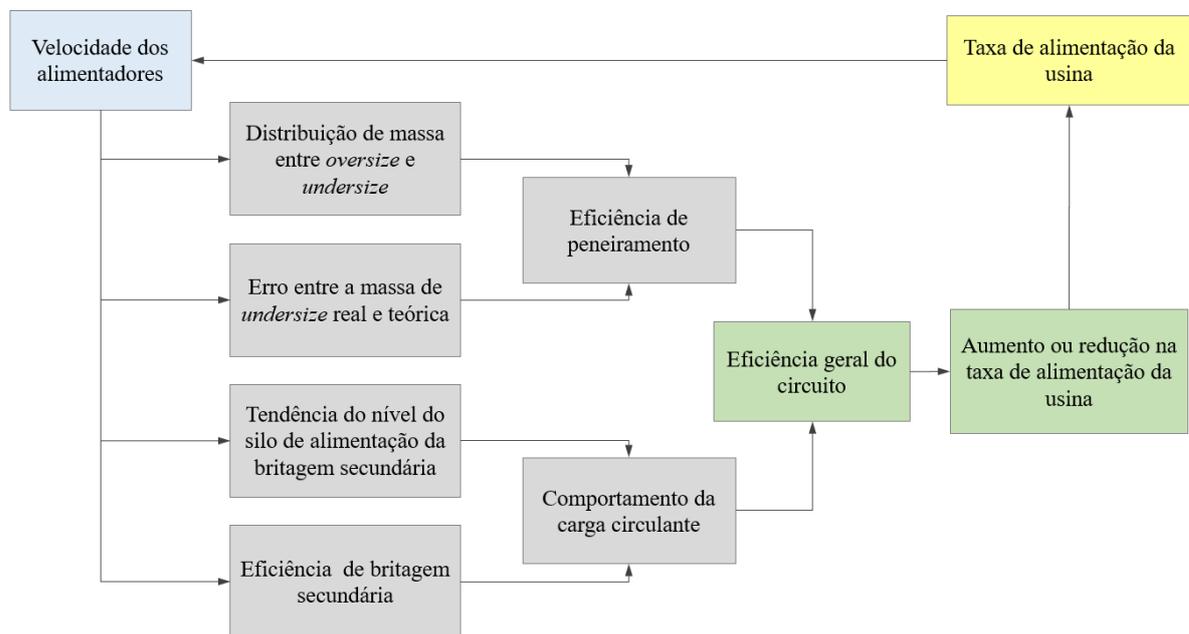


Fonte: GONÇALVES e BAETA (2019).

Como estratégia de controle, visando otimizar a taxa de alimentação para qualquer condição, foi desenvolvido um sistema especialista (Figura 38), que a partir de quatro variáveis

obtidas da planta em tempo real, foram calculadas duas novas variáveis de processo: eficiência de peneiramento e carga circulante. Para isso, foi feita uma soma ponderada pela relevância da variável em questão nos incrementos de *setpoint* da usina. Por fim, os incrementos de *setpoint* (tanto positivos quanto negativos) na taxa de alimentação foram obtidos pelo agrupamento, no domínio *fuzzy*, das duas variáveis obtidas a partir das eficiências de peneiramento e tendência da carga circulante (SILVA *et al*, 2018).

Figura 38. Estratégia de controle avançado da taxa de alimentação da usina.

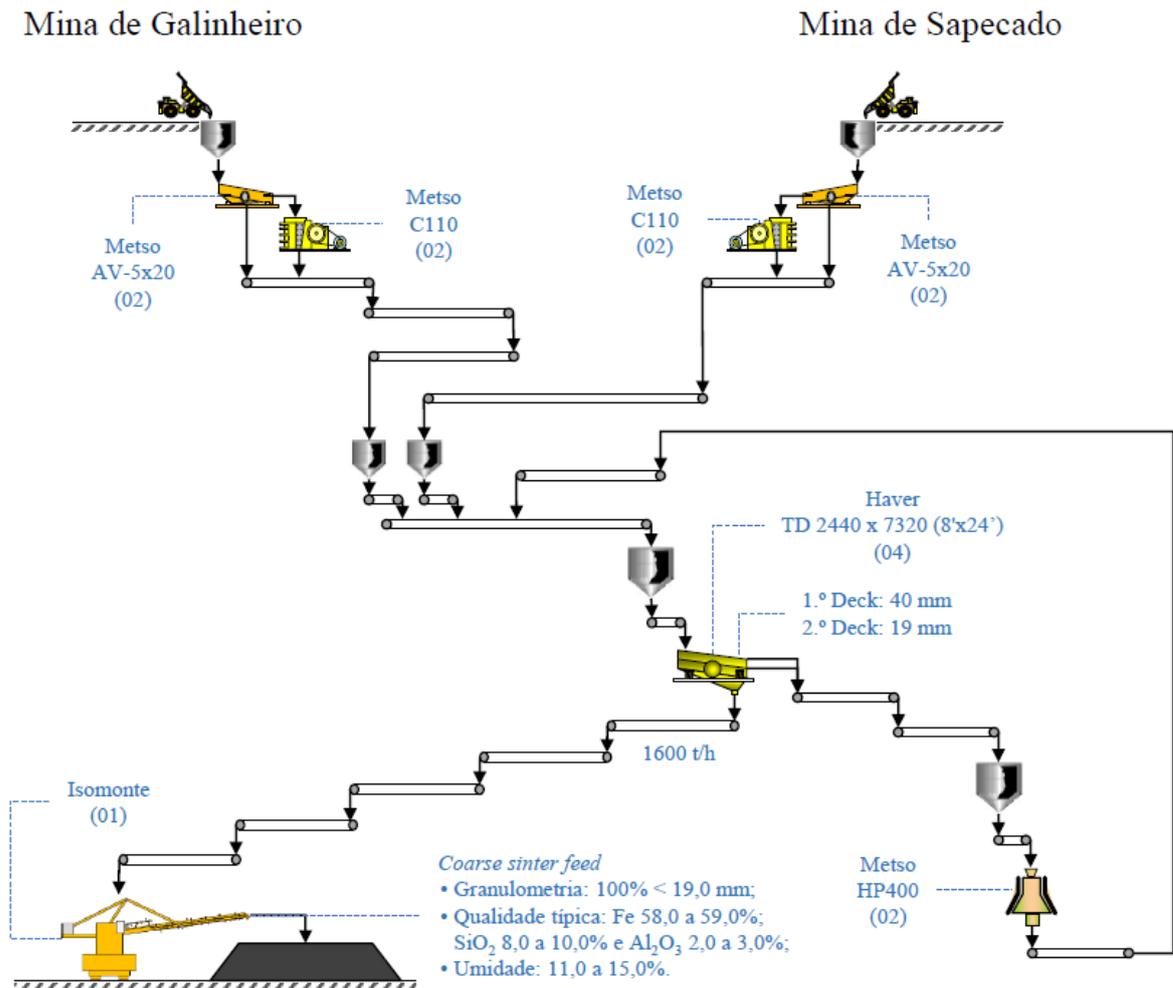


Fonte: Próprio autor.

A rota de processo do circuito a unidade natural da ITM-I é relativamente simples (Figura 39), sendo que a alimentação provém das minas de Galinheiro e Sapecado, onde estão instalados dois conjuntos de britagem primária em cada mina, sendo um deles reserva. Os sistemas são idênticos, compostos por silo, alimentador vibratório Metso AV-5x20 e britador de mandíbula Metso C110, operando com APA de 4". A partir das britagens primárias o minério é transportado por TCLDs até a planta de peneiramento primário, composto por silo, alimentadores de correia e quatro peneiras Haver TD 8' x 24'. Nas peneiras, o primeiro *deck* tem a função de alívio e opera com 40,0 mm de abertura, malha quadrada em borracha, enquanto o segundo *deck* opera com malha quadrada autolimpante de 19,0 mm. O *oversize* de ambos os *decks* é direcionado para a britagem secundária, composta por silo, alimentadores de correia e dois britadores HP400, que operam com revestimento *standard* e APF de 32,0 mm. Devido a

coesividade e a baixa resistência mecânica do minério processado, esta foi a configuração ótima para os britadores secundários, que garante eficiência de britagem acima de 75 % na malha de 19,0 mm, boa produtividade e menor frequência de paradas por “empastamento” em situações de maior umidade.

Figura 39. Fluxograma da ITM-I à umidade natural, Mina do Pico.



Fonte: Próprio autor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

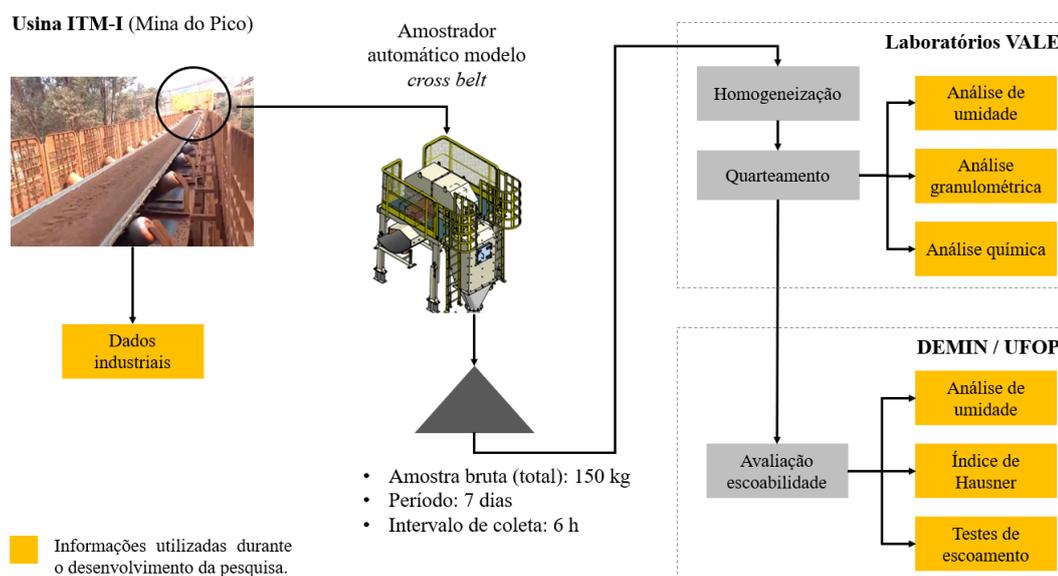
4.1 Amostra

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizada uma amostra de minério de ferro, proveniente da Mina do Pico, coletada na ITM-I a umidade natural.

4.2 Coleta e preparação das amostras

A amostra foi coletada em amostrador automático tipo *cross belt* Engedrar AMM-1000, instalado no transportador de correia de produto da usina ITM-I, da Mina do Pico. A amostragem ocorreu de forma sistemática, durante o período de uma semana, de forma a garantir maior representatividade da amostra. Foram coletados aproximadamente 150 kg de minério, em intervalos regulares de 6 h. A massa de cada incremento foi da ordem de 5,4 kg, que foi acumulada, homogeneizada, quarteada e separada em porções menores no laboratório físico da Vale. As análises granulométricas, químicas e umidade foram executadas nos laboratórios da Vale, enquanto o restante da amostra, dividida em porções de aproximadamente 10 kg foi encaminhado para o DEMIN/UFOP para prosseguimento da pesquisa (Figura 40).

Figura 40. Representação esquemática da preparação da amostra e os dados utilizados durante a pesquisa.



Fonte: Próprio autor.

4.3 Caracterização física

Foi determinado o teor de umidade da amostra bruta, e durante a fase de avaliação da escoabilidade do material nos laboratórios do DEMIN/UFOP, foram efetuadas novas análises de acordo com os ensaios em execução.

A análise granulométrica foi efetuada no laboratório de ensaios físicos da Vale, sendo consideradas as seguintes aberturas de peneiras: 19 mm; 16 mm; 12,5 mm; 10,0 mm; 8,0 mm; 6,3 mm; 4,0 mm; 2,0 mm; 1,0 mm; 0,5 mm; 0,15 mm e 0,106 mm, utilizando peneiramento a úmido.

4.4 Análise química

A análise química da amostra foi efetuada no laboratório da Vale, através do método de análise de fluorescência de raios X com pastilha fundida.

4.5 Superfícies avaliadas nos experimentos de escoamento em laboratório

As diferentes superfícies para os ensaios foram obtidas a partir de amostras de revestimentos industriais aplicados em diversas operações de tratamento de minérios. Os revestimentos foram fornecidos por empresas parceiras desta pesquisa, conforme Tabela 8.

Tabela 8. Amostras de revestimentos industriais avaliadas na pesquisa.

Nome comercial	Fornecedor
Arcoplate	Martin Engineering
Hardox 400	SSAB
CDP (<i>CastoDur Diamond Plate</i>)	Eutectic Castolin
UHMW Duramaxx (<i>Polietileno de ultra alta massa molecular</i>)	Baron Revestimentos Antiaderentes
Poliuretano	Haver & Boecker
Borracha natural	Haver & Boecker

Fonte: Próprio autor.

4.6 Aditivo reológico para os experimentos de escoamento em laboratório

O aditivo reológico avaliado foi obtido a partir de amostra de um dos produtos comerciais desenvolvidos para este fim, por uma das empresas parceiras desta pesquisa, conforme Tabela 9.

Tabela 9. Amostra de aditivo reológico avaliado na pesquisa.

Nome comercial	Descrição	Fornecedor
Slipcoat MRA™ Max	Óleo antiaderente para a prevenção de acúmulo de granéis sólidos	Hefest Minerals

Fonte: HEFEST MINERALS (2020).

Para os ensaios em laboratório foi considerado o produto Slipcoat MRA™ Max aplicado sobre os revestimentos metálicos CDP e Hardox, com o produto formando um filme de recobrimento na superfície em avaliação, de forma similar à aplicação industrial recomendada pelo fabricante. As principais propriedades físico-químicas do aditivo reológico são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10. Propriedades físico-químicas do aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max.

Parâmetro	Referência
Estado físico	Líquido
Tipo	Óleo
pH	6,4
Densidade	0,925
Solubilidade em água	Insolúvel
Viscosidade	0,077 a 0,082 Pa.s
Identificação de Perigo	Produto não perigoso
Toxicidade	Não-tóxico

Fonte: HEFEST MINERALS (2020).

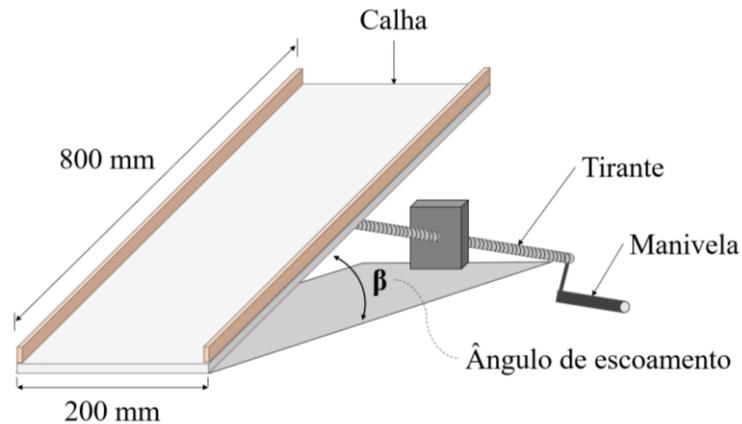
4.7 Protótipo para experimentos de escoamento em laboratório

No desenvolvimento do protótipo, foram considerados como referência os experimentos realizados por Rastogi et al (1993) e Silva (2005), citados no item 3.10. O objetivo inicial foi simular através de modelo físico o escoamento em calha, de forma a se obterem parâmetros de avaliação da escoabilidade de minérios coesivos sob determinada condição de inclinação, característica da superfície e do teor de umidade. A calha visa a simular através de comparação direta o comportamento do material em um chute reto, cujo escoamento ocorra por gravidade.

Para a condução dos experimentos em laboratório, o aparato proposto foi uma calha de inclinação controlada (Figura 41), com dimensões 200 x 800 mm, de modo que fosse possível

a avaliação da escoabilidade em revestimentos industriais nos tamanhos comumente encontrados no mercado, de 195 x 395 mm.

Figura 41. Protótipo da calha de inclinação controlada.



Fonte: Próprio autor.

Para elevação ou redução da inclinação da calha foi previsto um tirante rosqueado e acionado manualmente por manivela, de forma que a mudança no ângulo ocorresse de forma suave e a leitura do mesmo, pudesse ser feita de forma precisa. Para a medição do ângulo foi aplicado um inclinômetro de base magnética na parte inferior da calha. O material utilizado na fabricação foi aço-carbono 1045, com estrutura robusta para suportar a carga de duas placas de revestimentos industriais metálicos, cuja massa pode chegar a aproximadamente 22 kg. Os revestimentos são apoiados no ressalto existente na base da calha, não sendo necessário nenhum tipo de fixação adicional para os ensaios de escoamento (Figura 42).

Figura 42. Calha de inclinação controlada para ensaios de escoamento em laboratório: a. visão geral; b. detalhe do sistema de elevação e medição do ângulo.



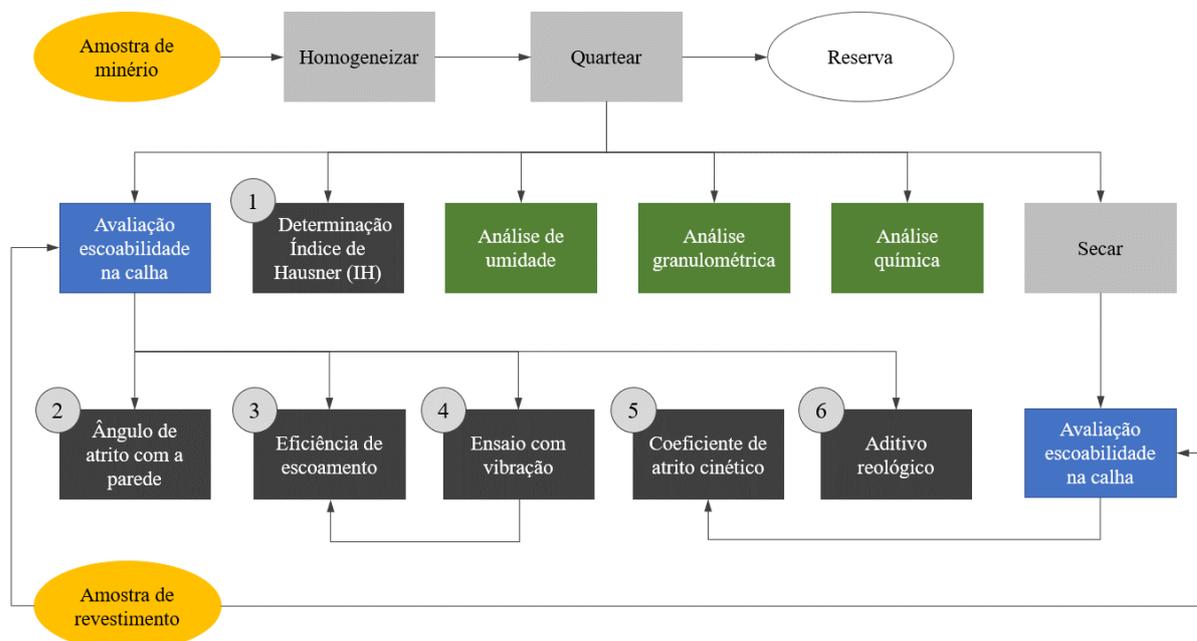
Fonte: Próprio autor.

4.8 Método de avaliação da escoabilidade

O procedimento consistiu na combinação de cinco parâmetros, a saber: índice de Hausner (IH), que caracteriza a escoabilidade do material a granel; ângulo de atrito com a parede, que determina qual o menor ângulo o material escoar por gravidade, partindo do repouso; eficiência de escoamento, que indica a porcentagem do material a granel que escoar pela calha em determinada superfície para a condição de umidade avaliada; ensaio com vibração, que tem por objetivo avaliar o aumento da eficiência de escoamento, quando a superfície é submetida à vibração e coeficiente de atrito cinético (μ_k), que infere a resistência ao escoamento devido a rugosidade da superfície.

Como possível alternativa para melhorar a fluidez de materiais a granel escoando por gravidade, também foi investigado o efeito do uso de aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max, aplicado sobre as superfícies dos revestimentos. As análises de umidade, granulometria e química foram complementares à avaliação. A Figura 43 ilustra a sequência dos ensaios abrangidos pela sequência metodológica.

Figura 43. Metodologia para avaliação da escoabilidade de minérios coesivos.



Fonte: Próprio autor.

4.8.1 Determinação do índice de Hausner (IH)

O índice de Hausner (IH) foi escolhido para ser o parâmetro principal para avaliação da escoabilidade do material em pesquisa, em diferentes faixas de tamanho e em diferentes classes de umidade.

Para determinação foi utilizada proveta de 500 ml e balança analítica com precisão mínima de duas casas decimais. O IH final foi obtido construindo curvas de número de impactos *versus* IH, e o valor considerado foi obtido após compactação final da amostra na proveta. A compactação foi feita manualmente, com impactos da proveta em superfície de borracha a uma altura de aproximadamente 25 mm, e frequência de aproximadamente 90 impactos/minuto.

4.8.2 Ângulo de atrito com a parede

O ângulo de atrito com a parede é o ângulo de escoamento em que o material partindo do repouso, escoará, sobre uma determinada superfície (SILVA, 2005). A determinação consistiu em alimentar aproximadamente 0,5 kg de material na calha, aumentar gradativamente a inclinação até o ponto em que ocorreu o escoamento total da amostra, registrando o ângulo (β) final conforme indicado na Figura 41.

4.8.3 Eficiência de escoamento

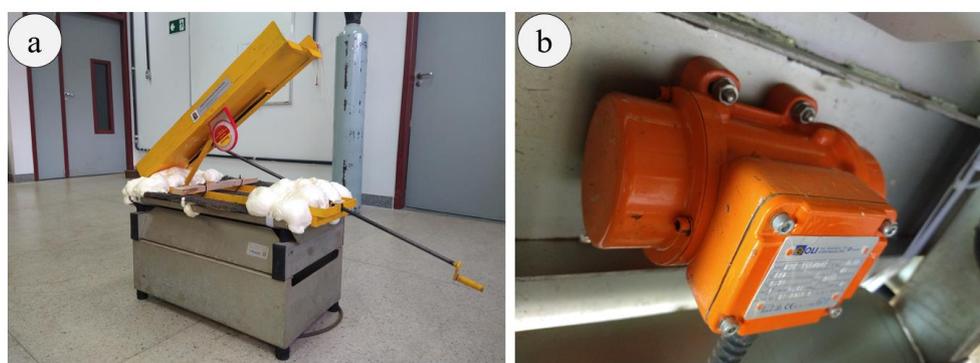
O ângulo de atrito com a parede para minério de ferro, sendo o aço como material da parede, varia de 33 à 42° (KVAPIL, 1965 *apud* SILVA, 2005). Dessa forma buscou-se comparar a eficiência de diferentes superfícies a partir de um parâmetro simples e de fácil entendimento, em um ângulo (β) de menor escoabilidade. A determinação foi feita com a inclinação da calha ajustada em 30°. Após alimentar a calha com aproximadamente 0,5 kg da amostra a ser utilizada, pesou-se o material que escoou pela calha e na sequência o material que ficou retido na mesma. A eficiência (equação 23) é a razão entre a massa que escoou pela massa alimentada (escoada + retida).

$$Eficiência = \frac{Massa\ escoada}{Massa\ escoada + Massa\ retida} \quad (23)$$

4.8.4 Ensaio com vibração

Para avaliar o efeito da vibração como auxiliar de descarga, a calha de inclinação controlada foi instalada sobre uma mesa vibratória, modelo VIATEST B3/7 (Figura 44.a). A mesa possui motovibrador com frequência de 60 Hz e força centrífuga (F_c) de 1,18 N (Figura 44.b). A eficiência de escoamento foi avaliada variando-se o tempo de vibração, e a massa escoada em cada intervalo, para diferentes patamares de umidade e superfícies.

Figura 44. Aparato para ensaio com vibração: a. calha de inclinação controlada instalada sobre mesa vibratória; b. motovibrador sob a mesa.



Fonte: Próprio autor.

4.8.5 Coeficiente de atrito cinético

O coeficiente de atrito cinético (μ_k), entre o material a granel seco e a superfície, infere a resistência ao movimento provocado pela rugosidade e/ou tipo de revestimento durante o escoamento por gravidade em um chute de transferência. A determinação consistiu em alimentar aproximadamente 0,5 kg de material seco na calha e aumentar gradativamente a inclinação até o escoamento total da amostra. Em seguida calculou-se a tangente do ângulo (β) final, de acordo com o método do plano inclinado, onde $\mu_k = \tan(\beta)$. Neste ensaio a amostra do material a granel seco foi peneirada abaixo de 2,0 mm, para minimizar o efeito do rolamento das partículas mais grosseiras (19 a 2,0 mm).

Para determinação do μ_k das partículas minerais sobre os revestimentos, sem considerar o efeito de rolamento ou de movimento induzido provocado pelo choque entre partículas, foi utilizado um disco de madeira de 90 mm de diâmetro e 15 mm de espessura, onde em uma das faces foram coladas partículas de minério seco na classe de tamanho 2,0 a 0,5 mm, que corresponde à faixa central da amostra avaliada (Figura 45). O disco foi posicionado na calha,

com a face do minério voltado para baixo em contato com o revestimento da calha. Gradativamente foi aumentada a inclinação até o deslizamento total do disco. Da mesma forma que para o material a granel solto, calculou-se a tangente do ângulo (β) final, de acordo com o método do plano inclinado, onde $\mu_k = \tan(\beta)$.

Figura 45. Disco de madeira com partículas de minério coladas em uma das faces para avaliação do coeficiente de atrito cinético.



Fonte: Próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Composição química

A composição química da amostra apresentada na Tabela 11 mostra que o material processado possui participação significativa de minerais hidratados em função dos altos teores de *perda por calcinação* (PPC) e Al_2O_3 . Cabe destacar ainda, que apesar do teor de SiO_2 estar mais elevado nas frações abaixo de 0,5 mm, a química global está dentro do previsto para o produto *coarse sinter feed* produzido pela unidade.

Tabela 11. Análise química por faixa granulométrica.

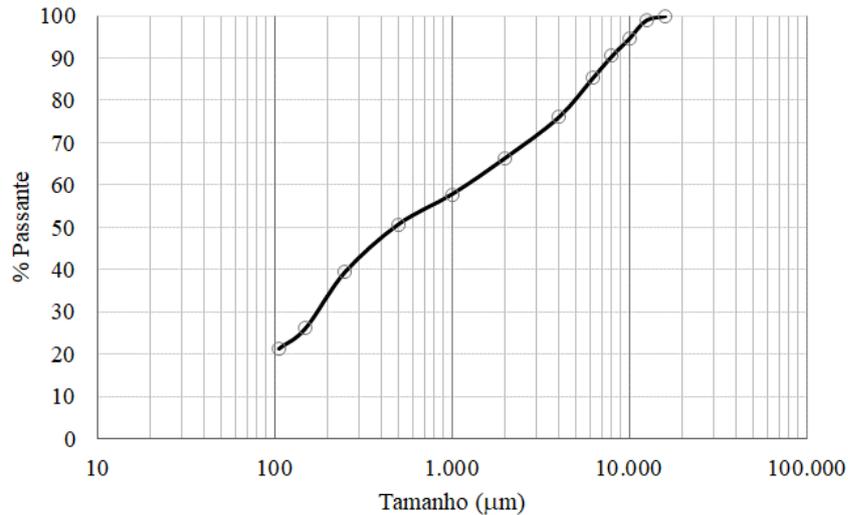
Faixa	% Massa	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	PPC
Global	100	58,35	8,75	2,24	0,081	0,096	5,47
19 mm a 6,3 mm	14,5	60,96	3,64	2,65	0,084	0,077	6,37
< 6,3 mm a 2,0 mm	19,1	61,52	2,75	2,56	0,090	0,114	6,64
< 2,0 mm a 0,5 mm	15,7	59,84	4,12	2,77	0,102	0,129	6,70
< 0,5 mm a 0,15 mm	24,6	53,3	17,15	1,95	0,075	0,095	4,88
<0,150 mm	26,1	58,44	10,84	1,72	0,066	0,076	3,93

Fonte: Próprio autor.

5.2 Distribuição granulométrica

A amostra em estudo apresenta um d_{80} igual a 5,0 mm e um d_{50} igual a 0,5 mm. A análise granulométrica, representada pela porcentagem passante é mostrada na Figura 46.

Figura 46. Distribuição granulométrica do produto da usina ITM-I da Mina do Pico.



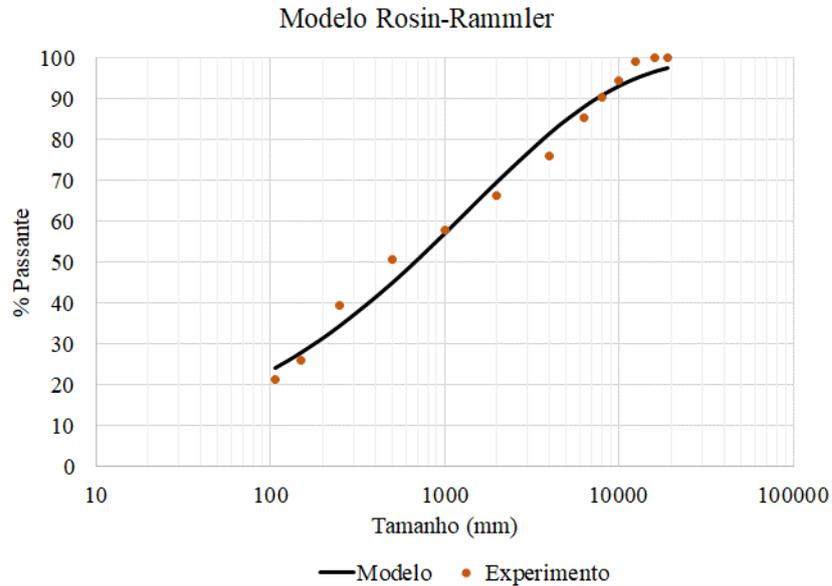
Fonte: Próprio autor.

Para expressar esta distribuição de acordo com a equação de Rosin-Rammler, foi criada a função-objetivo (F_0), que representa o desvio do modelo em relação ao experimento (equação 24).

$$F_0 = \sum_{i=1}^n \frac{(\%Passante \text{ Experimento} - \%Passante \text{ Modelo})^2}{\%Passante \text{ Experimento}} \quad (24)$$

Utilizando o suplemento *solver* do Microsoft Excel[®] foi possível determinar o d_{50} igual a 674,09 μm e parâmetro de agudez (m) igual a 0,50, que melhor representam a distribuição em termos matemáticos, e aproxima os valores reais (experimento) ao modelo calculado a partir da equação de Rosin-Rammler (Figura 47). A aderência do modelo aos dados reais foi bastante significativa, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9846.

Figura 47. Distribuição granulométrica real (experimento) e o modelo de Rosin-Rammler.

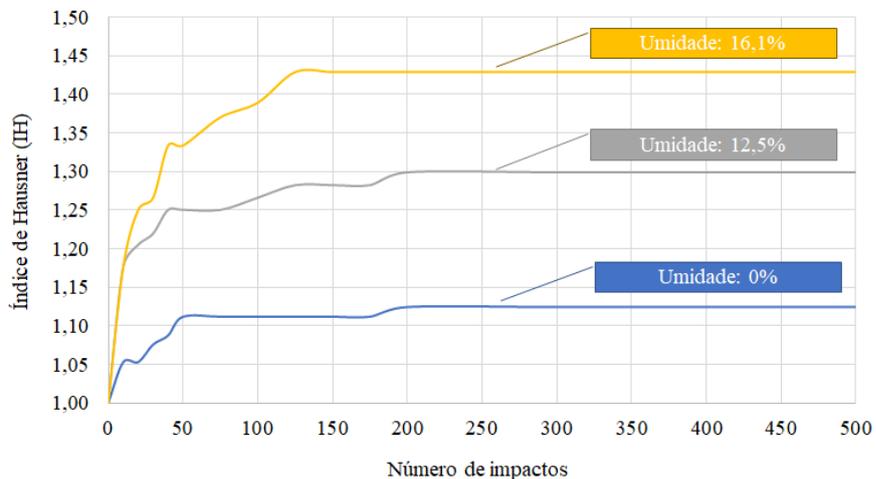


Fonte: Próprio autor.

5.3 Determinação do índice de Hausner

O IH determinado para a amostra global, mostra que o número de impactos para ocorrer a estabilização da massa específica compactada (ρ_c), e conseqüentemente o IH, ocorreu a partir de 200 impactos (Figura 48).

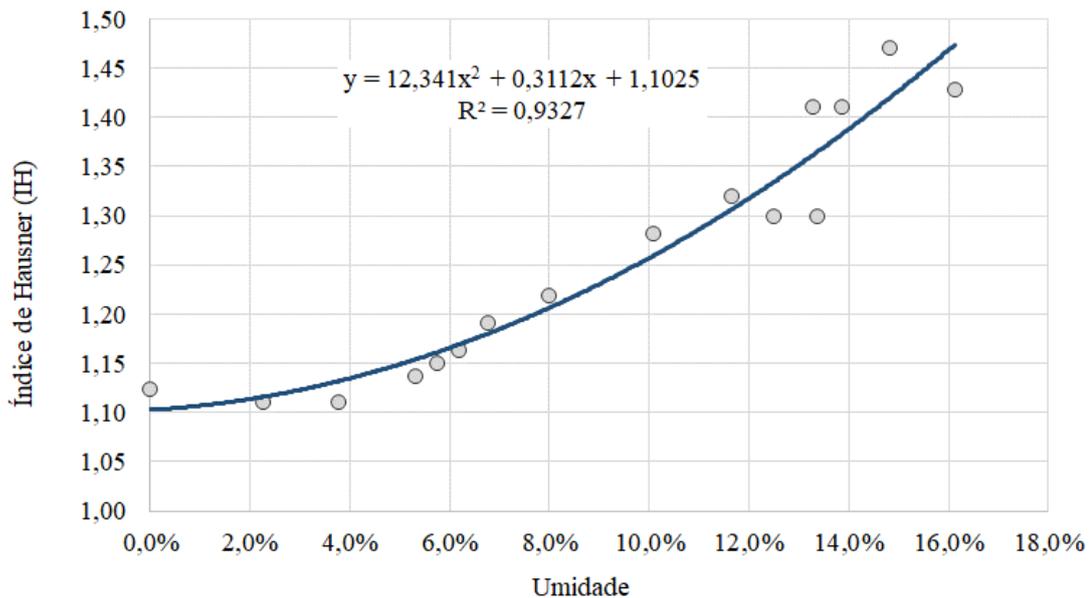
Figura 48. Índice de Hausner da amostra global para três níveis de umidade.



Fonte: Próprio autor.

Foi avaliada também a influência da umidade sobre o IH em diferentes patamares (Figura 49). Os dados mostram que a partir de 10,0% de umidade, o IH ultrapassa a referência de 1,25, e, portanto, de acordo com a classificação apresentada na Tabela 4, pode necessitar de lubrificantes ou revestimentos especiais para que ocorra o escoamento sem interrupções. A correlação entre o IH e o teor de umidade foi bastante elevada, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9327. A Figura 49 mostra ainda que o minério bruto (*run of mine* – ROM) da Mina do Pico, pode ser classificado como coesivo tanto período seco, onde a umidade média é igual 10,8%, quanto no período chuvoso, quanto a umidade média aumenta para 12,6%.

Figura 49. Índice de Hausner (IH) em diferentes patamares de umidade.

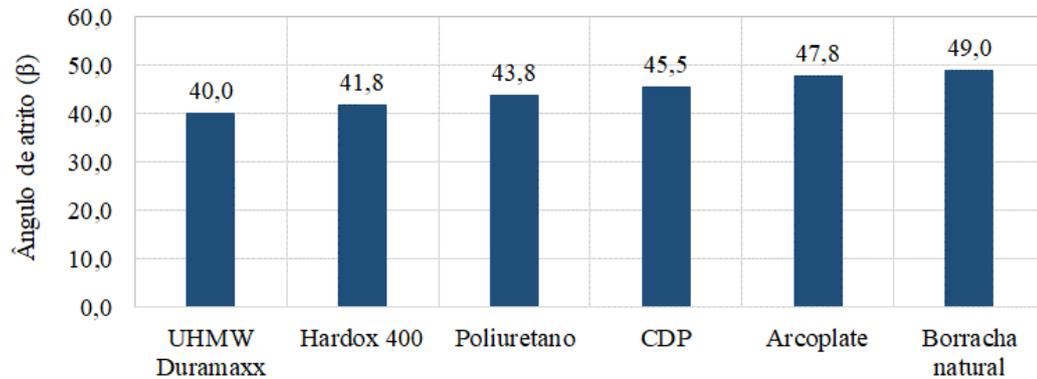


Fonte: Próprio autor.

5.4 Ângulo de atrito com a parede

Foram efetuados ensaios de escoamento utilizando a amostra global, abaixo de 19 mm. Os resultados para o ângulo de atrito com a parede são apresentados na Figura 50. A amostra teve o teor de umidade ajustado para 13,8 % e IH igual a 1,41. Com essa referência, o material avaliado pode ser classificado como coesivo, de acordo com a Tabela 4 do item 3.11. O UHMW Duramaxx apresenta o menor ângulo de atrito com a parede em comparação aos demais revestimentos testados, seguido do Hardox 400. Outra observação é que todos os revestimentos apresentaram ângulo de escoamento maior ou igual a 40°.

Figura 50. Ângulo de atrito com a parede para os diferentes revestimentos testados.

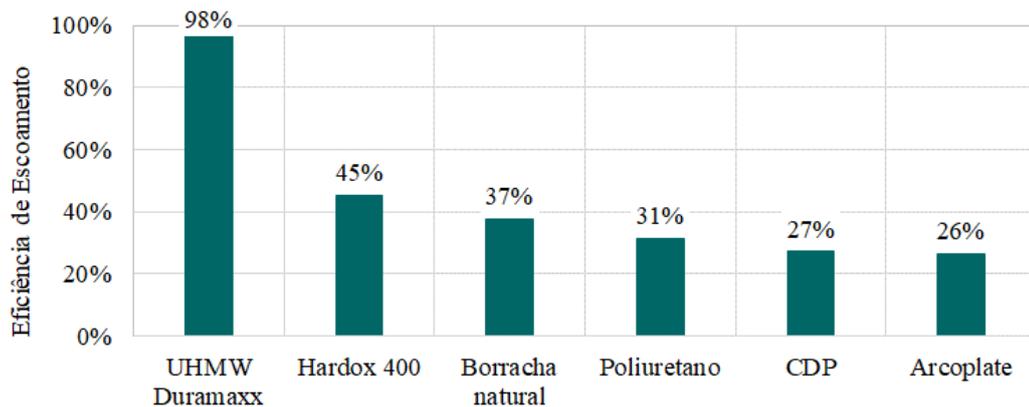


Fonte: Próprio autor.

5.5 Eficiência de escoamento

A eficiência de escoamento foi determinada conforme item 4.8.3. Os dados apresentados na Figura 51 também se referem a amostra de minério coesivo, com teor de umidade ajustado para 13,8% e IH igual a 1,41.

Figura 51. Eficiência de escoamento no ângulo de 30° para os diferentes revestimentos.

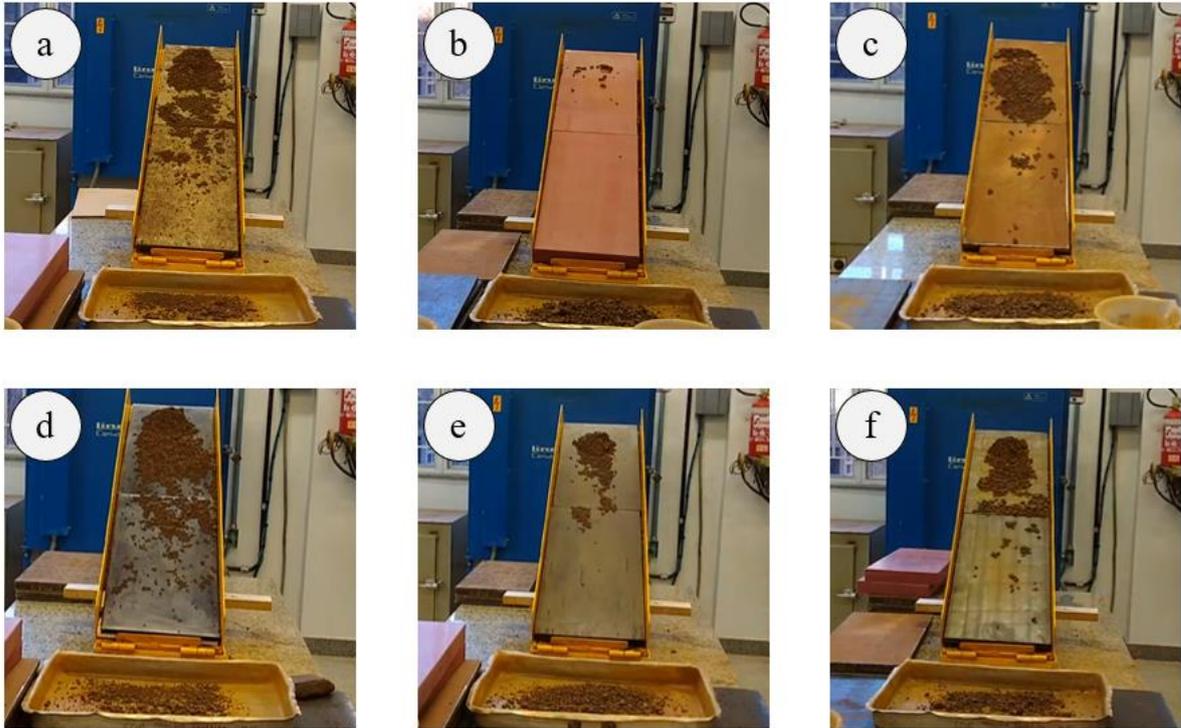


Fonte: Próprio autor.

Os ensaios para determinação de eficiência da fluidez em um ângulo intermediário (30°) permitiram comparar de forma rápida, entre os revestimentos disponíveis, qual foi o material mais apropriado para a aplicação. O UHMW Duramaxx apresentou melhor eficiência de escoamento (Figura 52.b). A diferença significativa comparada aos demais revestimentos

avaliados, provavelmente está associado ao menor coeficiente de atrito e à superfície autolubrificante e não aderente deste material (CALLISTER JR, 2008).

Figura 52. Ensaios de eficiência de escoamento: a. Arcoplate; b. UHMW Duramaxx; c. Hardox 400; d. poliuretano; e. borracha natural; f. CDP.

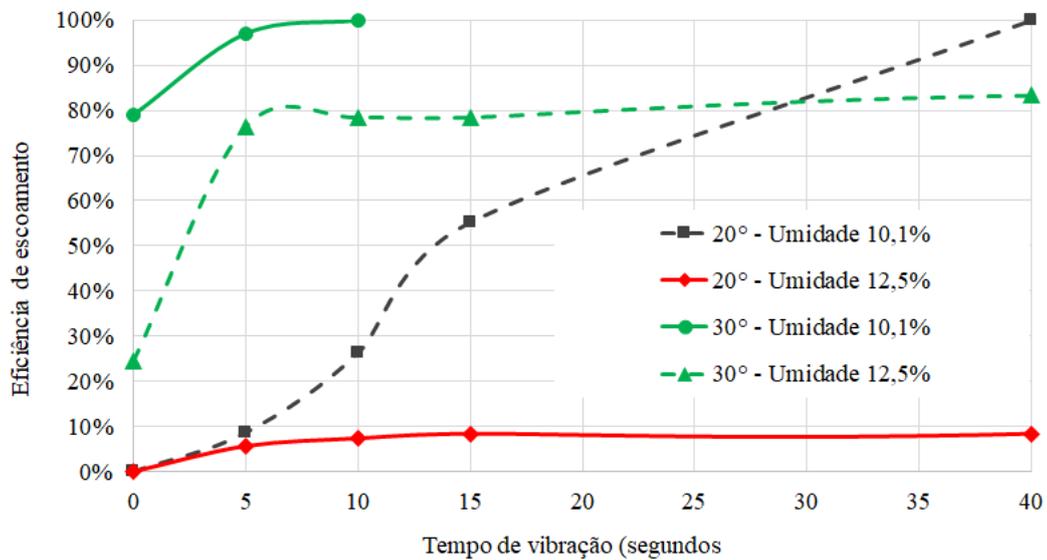


Fonte: Próprio autor.

5.6 Ensaios com vibração

Para investigação do efeito da vibração sobre a eficiência de escoamento, primeiramente foi avaliado o comportamento utilizando o revestimento em borracha, que normalmente apresenta desempenho inferior aos demais avaliados, sob condições estáticas. Foram selecionados os ângulos de 20° e 30° e dois níveis de umidade para avaliação, 10,1% e 12,5%. A Figura 53 mostra que, apesar do aumento na eficiência de escoamento partir do início da vibração, a umidade e o ângulo continuam com forte influência sobre o resultado.

Figura 53. Eficiência de escoamento com uso de vibração em revestimento de borracha.



Fonte: Próprio autor.

O efeito da vibração sobre a eficiência de escoamento no ângulo de 30° foi verificada de forma comparativa para as diferentes superfícies em estudo, utilizando amostra de minério coesivo com umidade ajustada para 11,3%. A Tabela 12 mostra que todos os revestimentos, mesmo os de pior desempenho de escoabilidade, conseguiram atingir eficiência acima de 95% com apenas 5 segundos de vibração, porém os revestimentos metálicos apresentaram maior dificuldade em escoar 100% da massa, mesmo com tempo de vibração relativamente alto (75 segundos).

Tabela 12. Eficiência de escoamento com vibração nos diferentes revestimentos.

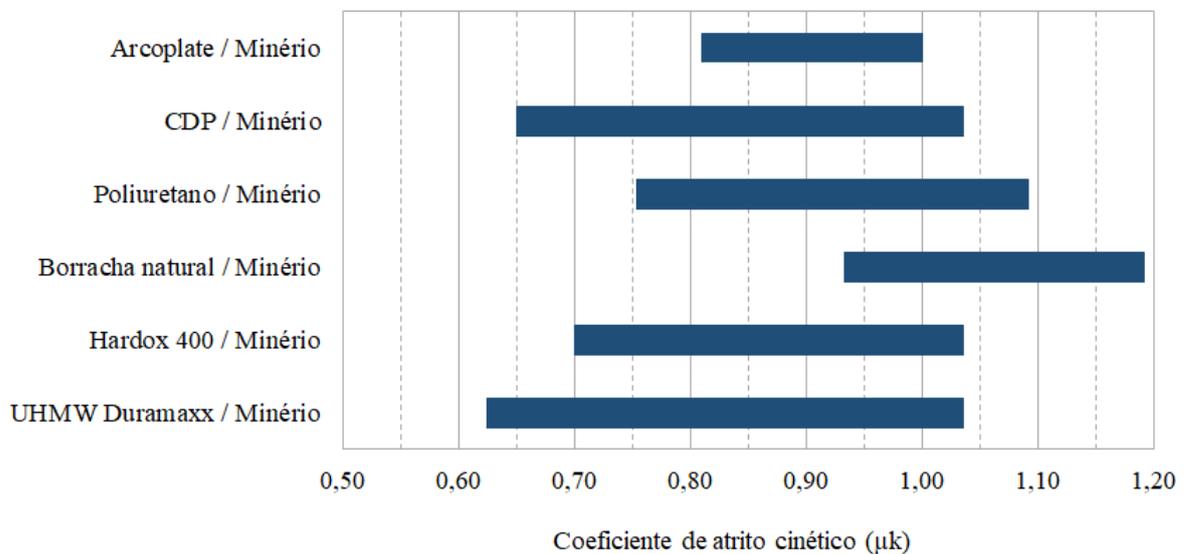
Revestimento	Tempo de vibração (segundos)		
	0	5	75
CDP	32,3%	97,1%	99,6%
UHMW Duramaxx	70,8%	100,0%	--
Hardox	38,1%	99,8%	99,9%
Borracha	46,3%	100,0%	--
Arcoplate	33,4%	95,9%	99,9%
Poliuretano	48,0%	100,0%	--

Fonte: Próprio autor.

5.7 Determinação do coeficiente de atrito cinético

O coeficiente de atrito cinético (μ_k) entre as diferentes superfícies e o minério a granel seco foi determinado conforme metodologia descrita no item 4.8.5. Para determinação do valor mínimo de cada faixa apresentada na Figura 54, foi considerado o resultado do escoamento do disco de madeira, onde em uma das faces foram coladas partículas de minério na faixa 2,0 a 0,5 mm, enquanto o valor máximo foi obtido considerando o escoamento da amostra de material “solto” abaixo de 2,0 mm.

Figura 54. Coeficiente de atrito cinético (μ_k) entre o minério e as diferentes superfícies avaliadas.



Fonte: Próprio autor.

O UHMW Duramaxx é o revestimento de menor coeficiente de atrito, mas com uma faixa de variação que abrangem outros materiais. Essa sobreposição de faixas de μ_k , para minério seco, e a grande diferença na eficiência de escoamento verificada anteriormente para minério úmido, sugere que os revestimentos possuam diferentes graus de hidrofobicidade e que este parâmetro afete a escoabilidade sobre os mesmos.

5.8 Ensaios de escoamento com aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max

Os ensaios de escoamento utilizando o aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max foram conduzidos sobre os revestimentos metálicos CDP e Hardox.

Para o revestimento CDP foi aplicado uma dosagem de 37 g/m² de aditivo, espalhada em toda a superfície, de forma a garantir uniformidade e a menor película possível. A avaliação foi feita com base na eficiência de escoamento do material no ângulo de 30° (Figura 55), cujo resultado foi de 33%. Comparado ao resultado sem aditivo (27%) apresentado na Figura 51 o aumento da eficiência foi pouco significativo.

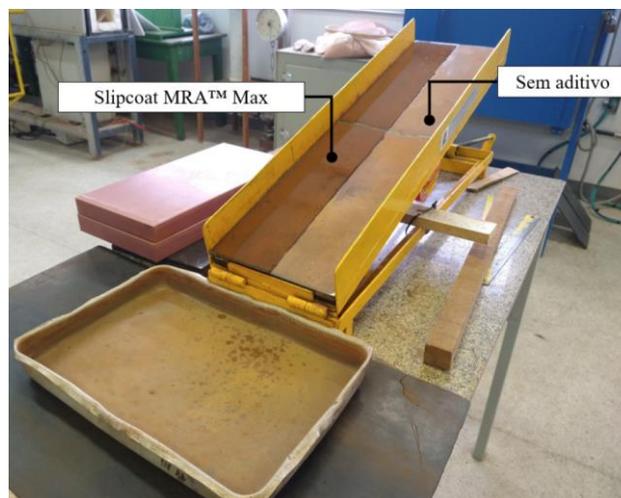
Figura 55. Eficiência de escoamento considerando aplicação de aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max sobre revestimento CDP.



Fonte: Próprio autor.

A avaliação do aditivo recobrimo o revestimento Hardox foi feita com dosagem de 53 g/m², espalhada em metade da superfície, de maneira uniforme em toda extensão longitudinal. A outra metade foi mantida “em branco”, sendo, portanto, uma comparação direta da escoabilidade com e sem o aditivo sobre a superfície (Figura 56).

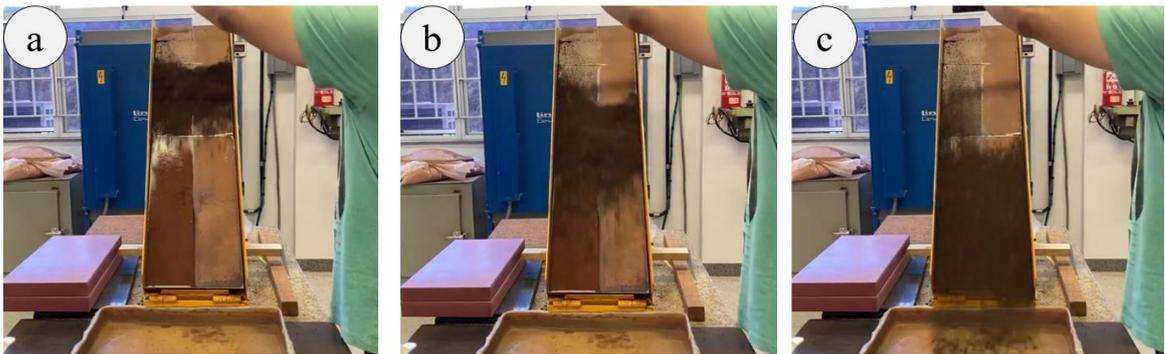
Figura 56. Aplicação do aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max sobre revestimento Hardox.



Fonte: Próprio autor.

Para esse ensaio, o ângulo foi ajustado para 45°. A Figura 57 mostra que nas diferentes etapas do ensaio comparativo ao longo da calha (a. início; b. meio; c. fim) não foi percebida diferença significativa no comportamento do escoamento do material entre as partes com e sem aditivo.

Figura 57. Comparação da escoabilidade com e sem aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max sobre revestimento Hardox.



Fonte: Próprio autor.

Os ensaios mostraram ainda que as forças adesivas do aditivo, entre as partículas e o revestimento, nesta faixa granulométrica, podem impactar negativamente a escoabilidade, fazendo com que partículas fiquem aderidas à superfície (Figura 58). Todavia não é possível fazer maiores afirmações sobre esse efeito para outras aplicações e condições de fluxo.

Figura 58. Partículas aderidas à superfície após aplicação do aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max.



Fonte: Próprio autor.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que é possível combinar a utilização de modelos físicos e experimentos de baixo custo e baixa complexidade, como o índice de Hausner, para avaliar a escoabilidade de minérios coesivos em diferentes superfícies.

O índice de Hausner pode ser mais explorado na Engenharia Mineral, sobretudo pela facilidade de execução e a possibilidade de obtenção de correlações, que vão além da caracterização da fluidez de materiais a granel. A correlação entre o IH e a umidade abre outras possibilidades, como por exemplo nas atividades de controle de processo em usinas com baixo nível de automação ou mesmo com restrições de ensaios físicos nos laboratórios.

Os ensaios para determinação do ângulo de atrito com a parede, e, também a eficiência de escoamento fornecem diretamente o comportamento esperado para um determinado revestimento, e para uma série de tipos experimentada, é possível selecionar o material mais adequado para a aplicação. É importante destacar, que neste trabalho não foi levada em consideração a dureza ou resistência à abrasão dos materiais. Portanto, para aplicações severas, com impacto direto e no manuseio de minérios muito abrasivos, recomenda-se optar por revestimentos metálicos de maior dureza, que nesta pesquisa o Hardox mostrou-se como uma das principais opções.

Para as aplicações cuja principal dificuldade seja a escoabilidade, o UHMW mostrou-se como a melhor aplicação, com diferença expressiva na eficiência de escoamento, comparado aos demais revestimentos testados.

A vibração como agente auxiliar de descarga mecânica melhorou significativamente a eficiência de escoamento, o que indica que essa solução pode contribuir para resolução de problemas de fluxo, sem necessitar de grandes investimentos, sobretudo em mudanças de *layout* das instalações.

O coeficiente de atrito cinético (μ_k) entre as diferentes superfícies e o minério em avaliação, não deve ser o único parâmetro para caracterizar a eficiência do revestimento sob o ponto de vista de escoabilidade. Mas permite inferência sobre o impacto do tipo e do acabamento superficial sobre a operação de manuseio.

Por fim, a aplicação do aditivo reológico Slipcoat MRA™ Max, na escala e nas condições estudadas, não mostrou ganho significativo em relação a eficiência de escoamento, ou mesmo maior fluidez do material sobre a calha.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a. Estudar a influência do desgaste dos revestimentos sobre a escoabilidade de minérios coesivos;
- b. Estudar a influência da altura de alimentação de chutes retos sobre o ângulo mínimo de escoamento com diferentes revestimentos;
- c. Realizar a caracterização da escoabilidade de diferentes tipos de minérios, nos mesmos patamares de granulometria e umidade, utilizando o índice de Hausner e ensaios de escoamento na calha de inclinação controlada;
- d. Desenvolver uma metodologia alternativa para dimensionamento de chutes retos a partir de ensaios de escoamento na calha de inclinação controlada e índice de Hausner;
- e. Realizar a caracterização da escoabilidade e resistência à abrasão de diferentes tipos de UHMW;
- f. Estudar a hidrofiliabilidade dos revestimentos e a influência sobre a escoabilidade de materiais a granel.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, **Standard D6128-97, Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell**. Annual Book of ASTM Standards, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14922: **Semi-acabados de UHMW — Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16214: **Minério de ferro — Método simplificado para determinação do teor de umidade para controle de processo**. Rio de Janeiro, 2013.

BRASKEN. **Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE)**. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/utec>. Acesso em 15 de dezembro de 2020.

CABREJOS, F. **Effect of moisture content on the flowability of crushed ores**. Powders e Grains. EPJ Web of Conferences, Vol.140, 2017.

CALFEN. **Catálogo geral equipamentos vibratórios**. Disponível em: <https://www.calfen.com.br/catalogos/CatalogoGeral.pdf>. Acesso em 11 de março de 2021.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7.^a Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Volume 01. São Paulo: Signus Editora, 2002.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Manuseio de sólidos granulados**. 2.^a Edição. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica. Processos de fabricação e tratamento**. Volume 3. 2.^a Edição. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CRAWFORD, R. J. **Plastics engineering**. 3rd ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1998.

DA LUZ, J. A. M. **Fotografia ponte de líquido (água) entre esférulas de vidro**. Laboratório de Reologia. UFOP; 2020.

EUTECTIC CASTOLIN. **CastoDur 450. Placa de Desgaste Resistente ao Impacto e à Abrasão Moderada**. Disponível em: <http://www.eutectic.com.br/catalogos/folheto-castodur450-mineracao.pdf>. Acesso em 15 de dezembro de 2020.

HEFEST MINERALS. **Ficha técnica – MRA – MAX**. Belo Horizonte, 2020.

FERNANDES, E. Z. **Aplicação da caracterização tipológica ao planejamento de lavra de minério de ferro**. [Dissertação]. Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte: UFMG; 2003.

FIORIO, R. **Síntese e caracterização de poliuretano termoplástico contendo poss via extrusão reativa**. Tese [Doutorado]. Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6.^a Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

GAVI, J. P. **Manual de inspeção e manutenção de correias transportadoras**. 4^o Edição. Vitória, 2001.

GONÇALVES, P. C.; BAETA, E. **Aumento da Utilização Física da ITM-I Pico**. Categoria Seis Sigma – Green Belt. Itabirito: Vale S/A, 2019.

HAYER & BOECKER. Manual de instruções peneira vibratória F-CLASS TD. Revisão 00. São Paulo, 2016.

ILIC, D. **Transfer Chute Analysis Techniques including Continuum Modelling and the Discrete Element Method (DEM)**. Proceedings, Bulk 2014, Materials Handling Engineers Association (MHEA). North Lincolnshire, 2014.

ILIC, D; HICKS, T. J. **Towards the development of design criteria for reduced wear in iron ore transfers**. In: 46^o Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 17^o Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro and to 4^o Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro. Rio de Janeiro, 2016.

INFOMET. **Aços resistentes ao desgaste. Aços-manganês austeníticos**. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=100>. Acesso em 16 de dezembro de 2020.

JENIKE, A. **Storage and flow of solids**. Bulletin 123, Engineering Experiment Station. Salt Lake City: University of Utah, 1964.

JENIKE & JOHANSON. **Solve or prevent poor flow**. Disponível em: <https://jenike.com/solutions/solve-or-prevent-poor-flow/>. Acesso em 22 de novembro de 2020.

KAIZER, M. D. **Otimização do volume e análise estrutural de caçamba para caminhão fora-de-estrada**. Dissertação [Mestrado]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Curitiba: PUC-PR, 2004.

KALENBORN. **Proteção cerâmica contra desgaste para equipamentos sujeitos a desgaste severo e temperaturas extremas**. Disponível em: <https://www.kalenborn.com/pt/produtos/materiais-resistentes-ao-desgaste/kalocer/>. Acesso em 16 de dezembro de 2020.

LABORGLAS. **Picnômetro Gay-Lussac**. Disponível em: <https://www.laborglas.com.br/produtos/vidrarias-laborglas/material-volumetrico/picnometro-gay-lussac>. Acesso em 11 de março de 2021.

MANO, E. B. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. 1.^a Edição. Rio de Janeiro: Editora Edgard Blücher. 1991.

MARTIN ENGINEERING. **Martin ARCOPLATE - Chapa de Desgaste**. Disponível em: https://martin-engineering.com.br/wp-content/uploads/2019/04/ET-DT-ARC_rev03-Data-Sheet-Arcoplate.pdf. Acesso em 15 de dezembro de 2020.

MARTIN ENGINEERING. **Canhões de Ar**. Disponível em: <https://www.martin-eng.com.br/content/product/3632/canhao-de-ar-hurricane>. Acesso em 11 de março de 2021.

MASCARENHAS, F.P.; MESQUITA, A.L.A.; MESQUITA, A.L.A. **Identificação de propriedades de fluxo do caulim e dimensionamento de tremonha de silo para fluxo mássico**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v.22, n.4, 2017.

MESQUITA, A.L.A. **Caracterização do escoamento de materiais granulares**. Belo Horizonte: FEM-ITEC/UFPA, 2014. 55 slides.

MILHOMEM, F. O.; DA LUZ, J. A. M. **Experimentos simples para estudo de granéis**. Revista Holos. Natal, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Boletim do Setor Mineral**. Brasília, 2020. 28 p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes/boletim-do-setor-mineral>. Acesso em 28 de setembro de 2020.

MITARAI, N. NORI, F. **Wet granular materials**. Advances in Physics, v. 55, pp. 1-45, 2006.

RASTOGI, S; DHODAPKAR, S.V; CABREJOS, F ; BAKER, J ; WEINTRAUB, M ; KLINZING, G.E ; YANG, W.-C. **Survey of characterization techniques of dry ultrafine coals and their relationships to transport, handling and storage**. Powder technology, 1993, Vol.74(1), pp. 47-59.

RILEY, G.S.; MANN, G. R. **Effects of particle shape on angles of repose and bulk densities of a granular solid**. Materials research bulletin, 1972, Vol.7(2), pp.163-169.

RIPPEL, M. M.; BRAGANÇA, F. C. **Borracha natural e nanocompósitos com argila**. Química nova, Janeiro 2009, Vol.32(3), pp.818-826.

ROSIÈRE, C. A.; RENGER, F. E.; PIUZANA, D.; SPIER, C. A. **Pico de Itabira, MG. Marco estrutural, histórico e geográfico do Quadrilátero Ferrífero**. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil, 2005. Disponível em: <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio042/sitio042.pdf>. Acesso em 22 de dezembro de 2020.

RUBBERBRAS. **Placas de revestimento**. Disponível em: <http://rubberbras.com.br/produtos/produto-placas-de-revestimento/>. Acesso em 17 de dezembro de 2020.

RUIZ, R. **Projeto de chutes de transferência de calcário e aditivos para minimizar problemas de fluxo de sólidos**. 7º Congresso Brasileiro do Cimento. São Paulo, 2016.

RUIZ, R.; CABREJOS, F.; MAZZINGHY, D. B. **Manuseio e estocagem de minérios: determinação das propriedades de escoamento através de testes em escala de laboratório**.

44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro. Belo Horizonte, 2014.

RUMPF, H. **Die Wissenschaft des agglomerierens**. Chem-Ing-Tech 46:1–11, 1974.

SAMPAIO, J. A.; DA SILVA, F. A. N. G. **Tratamento de Minérios: Práticas laboratoriais. Determinação das densidades de sólidos e de polpa**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SAW, H. Y.; DAVIES, C. E.; PATERSON, ANTHONY H. J.; JONES, J. R. **Correlation between powder flow properties measured by shear testing and Hausner ratio**. Procedia engineering, 2015, Vol.102, pp. 218-225

SCHULZE, D. **Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

SCHUBERT, H. **Untersuchungen zur Ermittlung von Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus körnigen Stoffen**. Ph.D. thesis, Univ. Karlsruhe, Germany, 1972.

SILVA, F. T. *et al.* **Framework e implantação ágil de sistemas especialistas**. 22 ° Seminário de Automação e TI. ABM WEEK. São Paulo, 2018.

SILVA, J. M. **Estudo do fluxo de material fragmentado na mineração subterrânea, com o uso de modelos físicos**. Tese [Doutorado]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

SILVA, J.M. **Tecnologia de manuseio de Graneis**. Programa ITV-PPGEM/UFOP. 2020.

SILVA, R. J. **Caracterização de sistema tribológico e seleção de ligas para revestimento de chutes de transferência de minério**. Dissertação [Mestrado]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Belo Horizonte: CEFET-MG, 2016.

SPLABOR. **Peneiras Granulométricas em aço Inox**. Disponível em: <https://www.splabor.com.br/produto/peneiras-granulometricas-em-aco-inox-diametro-8-2032mm-x-altura-2-50mm/>. Acesso em 11 de março de 2021.

SSAB. **Chapa antidesgaste Hardox para extrema resistência à abrasão**. Disponível em: <https://www.ssab.com.br/products/brands/hardox> . Acesso em 15 de dezembro de 2020.

VALE. **CVRD captura sinergias**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/investors/information-market/press-releases/Paginas/cvrd-captura-sinergias.aspx>. Acesso em 22 de dezembro de 2020.

VALE. **Vale informa sobre o Projeto West III**. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/Vale-informa-sobre-o-Projeto-West-III.aspx>. Acesso em 22 de dezembro de 2020.

VALE. **Produção e Vendas da Vale no 4T19 e em 2019 (PT)**. Rio de Janeiro, 2020. 19 p. Disponível em: <http://www.vale.com/PT/investors/information-market/quarterly->

results/ResultadosTrimestrais/PREREPOR2T20_p%20-%20vf.pdf. Acesso em 17 de outubro de 2020.

WOODCOCK, C. R.; MASON, J. S. **Bulk solids handling: an introduction to the practice and technology**. 3rd edition. London: Chapman and Hall, 1995.