

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS -
UNIDADE ARAXÁ

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas

Mestrado Profissional

Análise técnica do peneiramento a seco do minério de pirocloro (ROM)

Autor: Antonio Fernando Martins

Orientador: Prof. Dr. Fábio de São José

Coorientadora: Prof^a. Dr^a: Michelly dos Santos Oliveira

ARAXÁ – MINAS GERAIS
2023

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - UNIDADE
ARAXÁ

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas

Mestrado Profissional

Antonio Fernando Martins

ANÁLISE TÉCNICA DO PENEIRAMENTO A SECO DO MINÉRIO DE PIROCLORO
(ROM)

Exame de defesa de Mestrado apresentada ao Curso
de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro
Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Área de concentração: Engenharia de Minas

Orientador: Prof. Dr. Fábio de São José

Coorientadora: Dr^a. Michelly dos Santos Oliveira

ARAXÁ – MINAS GERAIS
2023

**ATA DA 24ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS –
MESTRADO PROFISSIONAL**

Aos 14 (quatorze) dias do mês de setembro do ano de 2023 (dois mil e vinte três), às 18h00min (dezoito horas), na sala 702, localizada no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Araxá, foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação do Mestrando Antonio Fernando Martins, sendo a banca examinadora composta pelo Prof. Dr. Fábio de São José (Presidente) – CEFET- MG, Prof(a). Dr(a). Michelly dos Santos Oliveira (Membro interno) – CEFET- MG, Eng. Me. Leandro Dias da Silva – CBMM (Membro externo) e Eng. Dr. Rafael de Souza Rodrigues – CBMM (Membro externo).

Dando início aos trabalhos o Presidente, com base no Regulamento do Programa e nas Normas que regem as Sessões de Defesa de Dissertação, concedeu ao Mestrando Antonio Fernando Martins, até 40 (quarenta) minutos para a apresentação do seu trabalho intitulado “Análise técnica do peneiramento a seco do minério de pirocloro (ROM)”, na Área de Concentração: Engenharia de Minas e Linha de Pesquisa Processamento de Minério e Rejeitos. Terminada a exposição, o Presidente da Banca examinadora passou a arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a Sessão, o Presidente solicitou aos presentes que se retirassem do recinto para que a banca examinadora procedesse a análise e decisão, anunciando, a seguir publicamente, que o Mestrando foi aprovado por unanimidade. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, vai assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo Mestrando.

Araxá, 14 de setembro de 2023

Prof. Dr. Fábio de São José
Presidente (CEFET-MG)

Profª Drª Michelly dos Santos Oliveira
Membro interno (CEFET-MG)

Engº Me. Leandro Dias da Silva
Membro externo (CBMM)

Engº Dr. Rafael de Souza Rodrigues
Membro externo (CBMM)

Engº Antonio Fernando Martins
Discente



Emitido em 14/09/2023

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 1/2023 - DMCAx (11.57.04)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 21/09/2023 07:55)

FABIO DE SAO JOSE
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMCAx (11.57.04)
Matrícula: ###631#9

(Assinado digitalmente em 21/09/2023 14:27)

MICHELLY DOS SANTOS OLIVEIRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMCAx (11.57.04)
Matrícula: ###233#2

(Assinado digitalmente em 25/09/2023 16:32)

ANTONIO FERNANDO MARTINS
DISCENTE
Matrícula: 2021#####2

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **1**, ano: **2023**, tipo:
ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO, data de emissão: **21/09/2023** e o código de verificação: **16409fea2d**

Martins, Antonio Fernando.
M386a Análise técnica do peneiramento a seco do minério de pirocloro (ROM) / Antonio Fernando Martins. – 2023.
 119 f. : il.

 Orientador: Prof. Dr. Fábio de São José.
 Coorientadora: Profa. Dra. Michelly dos Santos Oliveira.

 Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2023.
 Bibliografia.

 1. Beneficiamento de Minérios – Teses. 2. Peneiramento (Mineração) – Teses. 3. Minas e Mineração – Teses. I. De São José, Fábio. II. Oliveira, Michelly dos Santos. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 622.7

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por tanto carinho, atenção e amor.

Ao meu pai Antonio Martins das Graças (*in memoriam*) por nunca ter me abandonado e sempre acreditar em mim mesmo em momentos que até eu duvidava, você sempre será meu herói e guerreiro onde quer que você esteja. Minha mãe Teresinha Luciano Martins por ter me carregado em seu ventre por nove meses e ensinar meus primeiros passos. A minha esposa Fabiana Aparecida Rosa Martins e minhas filhas Adrielly, Lara e Sofia. Eu as amo e essa conquista também é de vocês.

Aos meus queridos professores e orientadores, Professor orientador Dr. Fábio de São José e professora coorientadora Dr^a. Michelly dos Santos Oliveira, obrigado pela atenção e orientação com todo o carinho e respeito. Aos professores Natal, Alexander, Mário, Marcélio e Thiago. Vocês contribuíram muito com a minha formação e com certeza são fonte de inspiração para mim e muitos alunos do CEFET- Araxá.

A empresa CBMM por fornecer os dados e condições nessa parceria, dando toda ajuda necessária. Ao meu Gerente Marcelo Pereira por ter acreditado em mim e na proposta do trabalho, você com certeza foi um dos pilares fortes nesse trabalho.

Enfim, muito obrigado a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização desse sonho que é receber o título de Mestre em Engenharia de Minas. Essa página seria pequena para expressar toda minha gratidão.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.”

(Martin Luther King)

RESUMO

Peneiras vibratórias são equipamentos amplamente utilizados nos circuitos de beneficiamento mineral em várias funções, na separação primária processando grandes blocos ou até mesmo em escalpe de finos para um britador, também pode ser usado em um processo de desaguento, processando polpas. O peneiramento de minérios ainda é um processo marcado por um escasso volume de informações específicas e pouca pesquisa desenvolvida. A maioria dos modelos e as relações entre as variáveis e parâmetros conhecidos surgiram a partir de testes de laboratório ou por métodos empíricos na indústria. Embora as funções do peneiramento sejam de fácil entendimento, o processo para dimensionar e selecionar os equipamentos é muito complexo. Quando a umidade do material é elevada, os cálculos podem apresentar muitos desvios. Esse trabalho propõe levantar as condições do minério ROM (*run of mine*) fazendo sua correlação com os parâmetros de desenvolvimento de peneiras para o peneiramento em umidade natural e verificar se esse peneiramento pode ser viável nessas condições. Dados de dimensões destes equipamentos, variáveis operacionais e do próprio material foram utilizados para os cálculos de dimensionamento de uma peneira ideal, e foram utilizados métodos clássicos de peneiramento. Dois métodos foram usados para este trabalho, o de Allis-Chalmers, resultando em uma área de $13,5 \text{ m}^2$ e o método de Peter King (MPK), resultando em uma área de $19,13 \text{ m}^2$. A peneira de escalpe com área menor pode ser usada, porém com redução da eficiência do peneiramento para 82%. O peneiramento a seco do material se mostra viável, tecnicamente, dentro da abertura de tela sugerida e de acordo com as tecnologias propostas tais como peneira tipo banana, movimento elíptico e uso de telas autolimpantes.

Palavras-chave: Peneiramento; Dimensionamento; Umidade natural; Telas.

ABSTRACT

Vibrating screens are equipment widely used in mineral beneficiation circuits in various functions, in primary separation processing large blocks or even fine scalping for a crusher, it can also be used in a dewatering process, processing slurries. Ore screening is still a process marked by a scarce volume of specific information and little research carried out. Most of the models and relationships between known variables and parameters have emerged from laboratory tests or based on trial and error in industrial experience. Although screening functions are easy to understand, the process for sizing and selecting equipment is very complex. When material humidity is considered high, the calculations may have many deviations. This work proposes to survey the conditions of the ROM ore (run-off-mine) making its correlation with the development parameters of screens for screening in natural humidity and verify if this screening can be viable under these conditions. Finally, it was raised how new technologies can help in this screening. Dimensional data of these equipment, operational variables and the material itself were used to calculate the dimension of an ideal sieve, using classic sieving methods. Two methods were used for this work, the Allis-Chalmers method resulting in an area of 13.5 m² and the Peter King method (MPK) resulting in an area of 19.13 m². A scalping screen with a smaller area can be used, but with a reduction of the screening efficiency to 82%. The dry sieving of the material is technically feasible within the suggested screen opening and according to the proposed technologies such as banana sieve, elliptical movement and use of self-cleaning screens.

Key words: Sieving; Sizing; Natural humidity; Screens.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma atual linha de britagem do pátio.....	14
Figura 2: Pilha em formação x pilha retomada.....	14
Figura 3 a e b: Pátio de Homogeneização mostrando (a) empilhamento de minério e (b) retomada	15
Figura 4: Desenho futuro após nova linha de alimentação	16
Figura 5: Fluxograma da nova linha de britagem do pátio	16
Figura 6: Localização da cidade de Araxá e vista aérea da Mina de Nióbio com os limites dos decretos minerários.....	20
Figura 7: Mapa Geológico do Complexo Carbonatítico de Araxá	21
Figura 8: Balanço de Massa	23
Figura 9: Comportamento coletivo.....	25
Figura 10: Mecanismos de peneiramento.....	25
Figura 11: Comportamento individual das partículas.....	26
Figura 12: Efeitos da umidade sobre o peneiramento.....	29
Figura 13: Grelha fixa inclinada.....	34
Figura 14: Grelha Vibratória.....	35
Figura 15: Peneira Vibratória	36
Figura 16: Movimento da partícula.....	36
Figura 17: Peneira Vibratória horizontal.....	37
Figura 18: Movimento da partícula horizontal.....	37
Figura 19: Peneira tipo Banana	38
Figura 20: Gráficos comparativos entre as vazões passantes em uma peneira vibratória inclinada convencional e uma peneira banana.....	39
Figura 21: Peneira banana com movimento elíptico	40
Figura 22: Peneira Rotativa.....	41
Figura 23: Malha de número #4.....	42
Figura 24: Chapas de aço com aberturas retangulares.....	44
Figura 25: Tela de borracha.....	45
Figura 26: Tela de poliuretano.....	46
Figura 27: Tela autolimpantes	47
Figura 28: Tipos de aberturas de tela.....	48
Figura 29: Tabela comparativa dos movimentos de vibração de peneiras.....	49
Figura 30: Gráfico Amplitude x Tamanho do Corte	50
Figura 31: Fator de capacidade "C" para separações maiores que 25 mm	54
Figura 32: Fator devido à quantidade de <i>oversize</i> "K"	54
Figura 33: Fator devido à quantidade de <i>oversize</i> "M".....	55
Figura 34: Fator de umidade em função da abertura da peneira.....	56
Figura 35: Diâmetros equivalentes para uma mesma partícula	65

Figura 36: Forma de partícula. Grau de esfericidade x curvatura.....	66
Figura 37: Forma de partícula. Grau de esfericidade.....	67
Figura 38: Peneira Circular Infinita.....	70
Figura 39: Capacidade específica versus umidade para tela de 16 mm.....	72
Figura 40: Capacidade específica dos casos A, B e C.	72
Figura 41: Capacidade específica dos casos A e D.....	74
Figura 42: Capacidade específica para os casos F e G	76
Figura 43: Peneirabilidade Caso A versus peneira circular	76
Figura 44: Caso A versus peneira banana	77
Figura 45: Capacidades específicas Caso A contra CEC Allis-Chalmers	79
Figura 46: Capacidades específicas para o Caso B contra CEC Allis-Chalmers	79
Figura 47: Comparação entre PCI e caso C.....	80
Figura 48: Comparação entre caso D e CEC	81
Figura 49: Comparação entre caso E e CEC	81
Figura 50: Caso A versus peneira banana	82
Figura 51: Modelo da peneira utilizada.....	84
Figura 52: Tela de aço com perfil losango (Linha A)	85
Figura 53: Tela de PU com perfil "H" retangular (Linha B).....	85
Figura 54: % de área aberta	86
Figura 55: Gráfico indicando a taxa de alimentação das duas linhas	86
Figura 56: Ganhos financeiros.....	87
Figura 57: Número de telas descartadas ao longo do tempo	88
Figura 58: Amostradores corta fluxo primário e secundário na torre de amostragem da CBMM.....	93
Figura 59:: Gráfico da distribuição Granulométrica.....	97
Figura 60: Histograma da densidade aparente <i>in situ</i> (g/cm ³)	99
Figura 61: Umidade <i>in situ</i> (%).....	100
Figura 62: Gráfico da umidade <i>in situ</i> X umidade pós-desmonte.	102
Figura 63: Foto do fragmento 08 e suas dimensões.....	104
Figura 64: Efeito do carregamento na eficiência	113

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Cálculo da eficiência.....	28
Equação 2: Cálculo da área da peneira (m^2)	53
Equação 3: Cálculo da área da peneira utilizando MPK.....	58
Equação 4: Cálculo da capacidade unitária W_u^f	58
Equação 5: Cálculo de W_u^F corrigido.....	59
Equação 6: Cálculo de K_1	59
Equação 7: Cálculo de K_2	59
Equação 8: Cálculo de K_3	59
Equação 9: Cálculo de K_4	60
Equação 10: Cálculo de K_5	60
Equação 11: Cálculo de K_9	61
Equação 12: Cálculo de K_{10}	61
Equação 13: Cálculo da altura da camada	62
Equação 14: Cálculo da relação de classificação RR.....	63
Equação 15: Cálculo da eficiência de peneiramento E.....	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Atual configuração do Pátio de Homogeneização	13
1.2. Nova configuração do Pátio de Homogeneização	15
1.3. Importância da pesquisa.....	17
1.4. Justificativa	18
1.5. Objetivo.....	18
1.5.1. Objetivo Geral.....	18
1.5.2. Objetivos específicos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Localização da Jazida.....	20
2.2. Geologia local	20
2.3. Fundamentos do Peneiramento	23
2.4. Mecanismo do peneiramento	24
2.4.1. Comportamento coletivo.....	24
2.4.2. Comportamento individual das partículas	26
2.5. Eficiência de peneiramento	27
2.6. Efeitos da umidade no peneiramento a seco	28
2.7. Tipos de peneiras.....	31
2.8. Tipos de grelhas e peneiras	33
2.8.1. Grelhas de Barras Fixas	33
2.8.2. Grelhas Vibratórias	34
2.9. Peneiras vibratórias.....	35
2.9.1. Peneiras vibratórias inclinadas.....	35
2.9.2. Peneiras vibratórias horizontais	37
2.10. Peneiras moduladas ou Banana Screens	38

2.11.	Peneira Banana com movimento elíptico	40
2.12.	Peneiras Rotativas.....	41
2.13.	Tipos de telas.....	42
2.13.1.	Telas com fio de aço	44
2.13.2.	Telas de borracha	44
2.13.3.	Telas de poliuretano	46
2.13.4.	Telas autolimpantes.....	46
2.13.5.	Tipos de movimentos	48
2.14.	Dimensionamento de peneiras industriais.....	50
2.14.1.	Método de Allis-Chalmers (MAC) 95	53
2.14.2.	Método de Peter King (MPK).....	58
2.15.	Determinação da largura da peneira.....	62
2.16.	Eficiência do peneiramento.....	62
2.17.	Análise granulométrica	63
2.18.	Índice de forma	65
2.19.	Tecnologias para o peneiramento a seco	67
2.20.	Como evitar o entupimento.....	69
2.21.	Exemplo 01	70
2.21.1.	Caso A (Abertura de 16 mm)	71
2.21.2.	Caso D (Abertura de 25 mm).....	73
2.21.3.	Ensaio com Bauxita, casos F e G.....	74
2.21.4.	Comparação da PCI contra Peneira Circular no caso A.	76
2.21.5.	Comparação da PCI contra Peneira Circular no caso A.	77
2.21.6.	Comparação entre o método proposto e o método Allis-Chalmers para dimensionamento de peneiras	78
2.21.7.	Comparativo Caso A	78
2.21.8.	Comparativo Caso B	79

2.21.9.	Comparativo Caso C	80
2.21.10.	Comparativo Caso D	80
2.21.11.	Comparativo Caso E	81
2.21.12.	Comparativo caso A x peneira elíptica e aceleração 5,5 G.....	82
2.21.13.	Conclusão do caso 1.....	82
2.22.	Exemplo 02	83
2.22.1.	Resultados	85
2.22.2.	Área aberta	85
2.22.3.	Taxa de alimentação.....	86
2.22.4.	Tempo de vida útil	87
2.22.5.	Conclusão do caso 2.....	88
3.	METODOLOGIA	89
3.1.	Distribuição Granulométrica do minério.	90
3.2.	Cálculo da densidade aparente.....	90
3.3.	Cálculo da umidade <i>in situ</i>	91
3.4.	Índice de forma	92
3.5.	O valor de umidade do material após desmonte e carregamento.....	93
3.6.	Metodologia para dimensionamento da peneira	94
3.7.	Análise através de engenharia reversa da peneira de escalpe (CBMM).....	94
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
4.1.	Granulometria do minério ROM.....	96
4.2.	Densidade <i>in situ</i>	99
4.3.	Umidade <i>in situ</i>	100
4.4.	Umidade pós-desmonte.....	101
4.5.	Índice de forma	103
4.6.	Avaliação das características da peneira para o minério de pirocloro	104

4.6.1.	Peneira tipo Banana com movimento elíptico	105
4.6.2.	Peneira Vibratória de classificação	105
4.6.3.	Grelha ou peneira vibratória para escalpe.....	106
4.6.4.	Avaliação do movimento da peneira.....	106
4.6.5.	Avaliação do tipo de tela.....	107
4.6.6.	Avaliação do tipo de abertura.....	108
4.6.7.	Avaliação do sistema de limpeza das telas.....	108
4.7.	Dimensionamento da peneira.....	108
4.7.1.	Dimensionamento da peneira utilizando o método Allis-Chalmers	109
4.7.2.	Dimensionamento da peneira utilizando o método MPK.....	110
4.7.3.	Análise através de engenharia reversa da peneira de escalpe (CBMM).....	112
5.	CONCLUSÃO	114
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO	116
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

1. INTRODUÇÃO

O presente estudo foi realizado com dados do minério do complexo Alcalino Carbonático de Araxá, com a finalidade de investigar as condições técnicas do peneiramento a seco do minério ROM (*run of mine*) em uma granulometria específica. Assim sendo uma nova linha de alimentação do Pátio de Homogeneização será construída para expandir o pátio atual e aumentar a autonomia de alimentação das usinas de concentração.

A prática operacional evidencia que o conhecimento prévio das características do material a ser peneirado é fator fundamental para o bom controle de processo e maior assertividade nos projetos de peneiras industriais. Materiais com características favoráveis ao peneiramento, geralmente, exigem menor área para uma mesma vazão em relação àqueles considerados de difícil peneiramento.

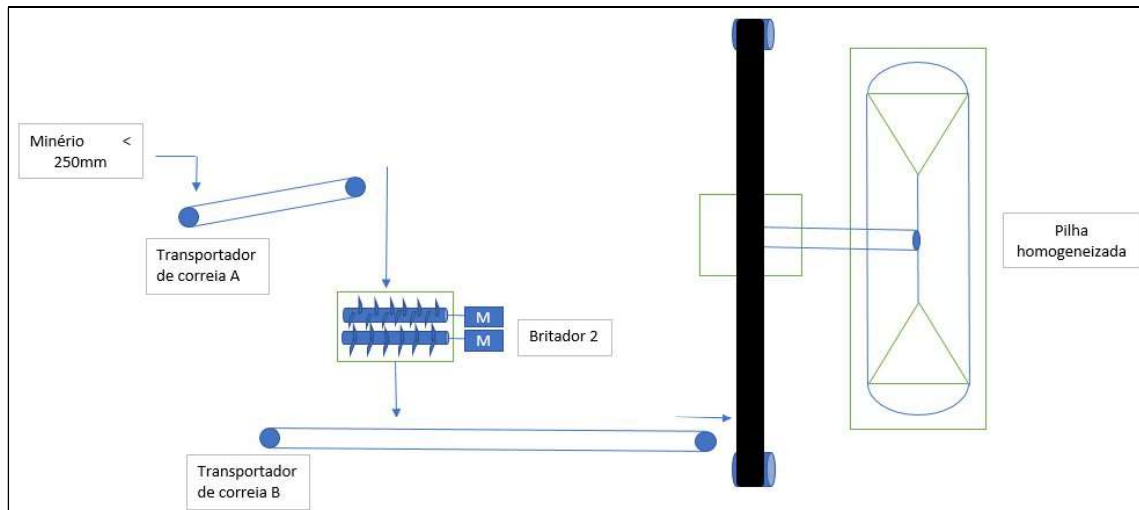
O sucesso do empreendimento minerário depende, portanto, da gestão eficiente nos controles de processos e operacionais, os quais estão intimamente ligados ao dimensionamento correto e assertivo dos equipamentos das plantas de beneficiamento, e na correta operação dos mesmos.

1.1. Atual configuração do Pátio de Homogeneização

Para formação das pilhas, o material proveniente da mina é transportado via caminhão até o ponto de alimentação, onde é basculado no silo 01 e através de um alimentador de sapatas o material passa para uma grelha vibratória de 250 mm sendo classificado em dois fluxos: o *oversize* (material maior que 250 mm) é separado e empilhado na lateral para descarte. O *undersize*, menor que 250 mm, segue o fluxo e é transportado por transportadores de correias até o prédio da britagem onde todo o fluxo passa por um britador de rolos dentados com abertura de até 100 mm em fluxo aberto. Esse minério é empilhado em pilhas no pátio de homogeneização, conforme Figura 1. A retomada do minério é realizada com uma retomadora

de duas rodas de caçamba, que descarrega o material retomado nos transportadores de correia, que por sua vez alimentam a usina de beneficiamento.

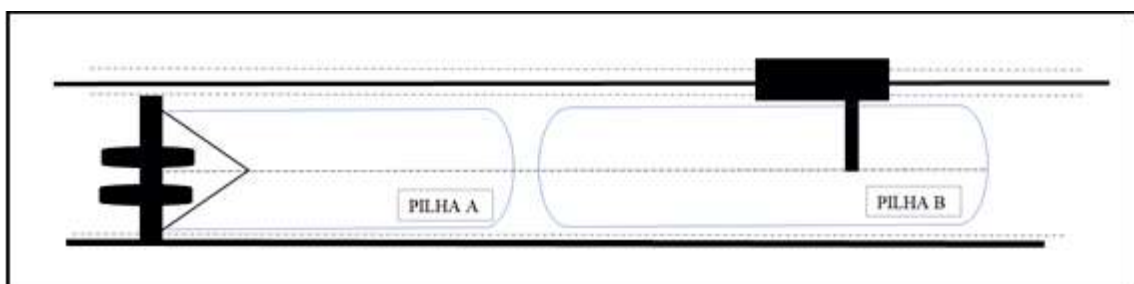
Figura 1: Fluxograma atual linha de britagem do pátio



Fonte: Própria do autor. (2022)

O pátio de homogeneização atualmente possui uma dimensão de aproximadamente 450 metros, o desenho atual do pátio de homogeneização é duas pilhas divididas em uma única linha. Cada pilha tem aproximadamente 200 metros de comprimento, 32 metros de largura e 12 metros de altura, conforme Figura 2.

Figura 2: Pilha em formação x pilha retomada



Fonte: Própria do autor. (2022)

Enquanto uma pilha está em formação, como mostra a Figura 3a, a outra está em retomada conforme a Figura 3b. O tempo médio de formação de uma pilha, no atual ritmo de produção da CBMM, é de aproximadamente 2,2 dias enquanto que a retomada da mesma dura em torno de 2,6 dias.

Figura 3 a e b: Pátio de Homogeneização mostrando (a) empilhamento de minério e (b) retomada



Fonte: SILVA. (2019)

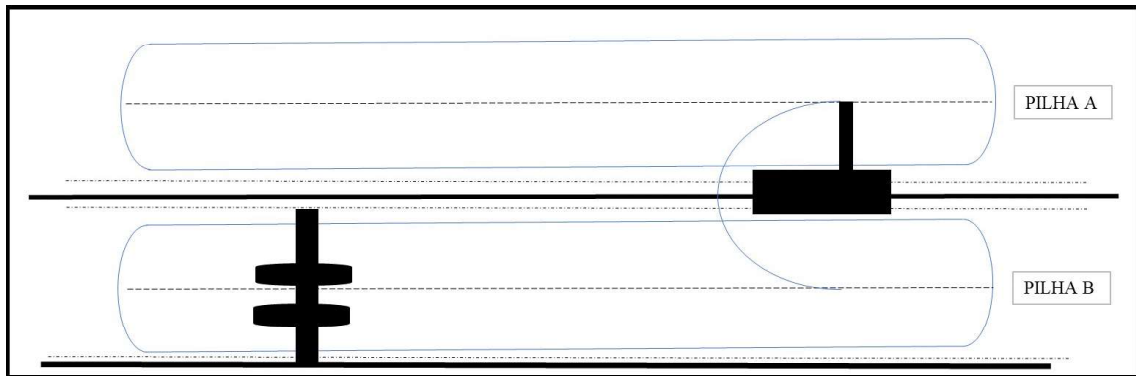
O processo de formação das pilhas de minério segue o método *Chevron*, com um sistema com eixos coincidentes, com duas pilhas em linha, e na expansão, com formação de duas pilhas em paralelo. A empilhadeira possui lança móvel e giratória, no entanto, o empilhamento está sendo realizado somente em eixo único. O retomador é bidirecional.

1.2. Nova configuração do Pátio de Homogeneização

A nova linha de alimentação do pátio de homogeneização foi pensada para dar uma autonomia em torno de 5 dias de material homogeneizado nas usinas de beneficiamento. A taxa de alimentação de projeto do pátio de homogeneização será de 4000 t/h (base úmida), contra uma atual de projeto de 1750 t/h (base úmida).

O pátio de homogeneização continuará com uma dimensão de aproximadamente 450 metros, porém com duas pilhas paralelas. Cada pilha terá aproximadamente 450 metros de comprimento, 32 metros de largura e 12 metros de altura. Após a nova linha de alimentação com taxa de 4000 t/h o novo desenho do pátio de homogeneização será conforme a Figura 4.

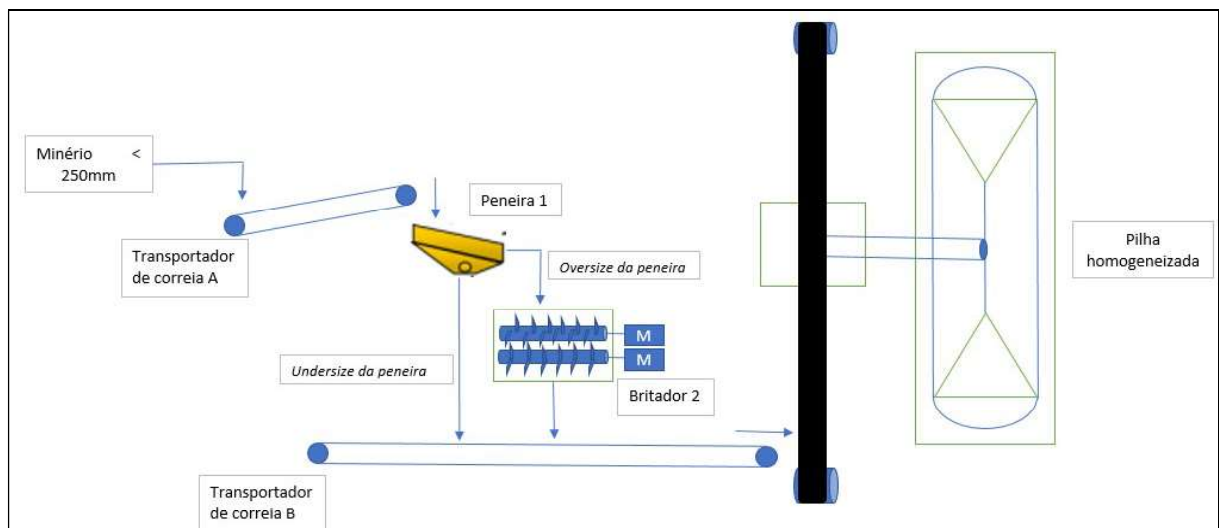
Figura 4: Desenho futuro após nova linha de alimentação



Fonte: Própria do autor. (2022)

A nova linha de empilhamento terá um britador de rolos dentados com capacidade de 1750 t/h (base úmida), idêntico ao que existe hoje na linha atual de empilhamento e por esse motivo será necessário um escalpe do material alimentado, para a carga da alimentação do britador novo, limitado à 1750 t/h. Dessa forma será retirado da britagem o *undersize* da peneira, conforme Figura 5. Após a etapa do peneiramento o *oversize* da peneira passará pelo britador e após ser britado em circuito aberto todo o material britado e o *undersize* da peneira se juntam para a etapa posterior que será o empilhamento. Por esse motivo uma peneira vibratória se faz necessária para realizar esse escalpe com o material com umidade natural.

Figura 5: Fluxograma da nova linha de britagem do pátio



Fonte: Própria do autor. (2022)

1.3. Importância da pesquisa

Um britador dimensionado para uma alimentação de 4000 t/h requer uma estrutura muito grande de engenharia civil e seu custo é elevado. Através da redução da alimentação do britador via peneira de escalpe em umidade natural pode-se reduzir os custos de compra, operação, instalação e manutenção do equipamento.

O estudo em questão se justifica pela baixa eficiência da operação do peneiramento em umidade natural devido principalmente ao alto índice de umidade natural do minério (ROM), onde as partículas finas interagem com a umidade podendo ocasionar a obstrução da tela da peneira, e pela escassez de teoria específica sobre o assunto. Em alguns casos o peneiramento pode ser quase impossível, ou até mesmo impossível.

O peneiramento em umidade natural está se tornando uma realidade nas empresas do mundo pelo fato de questões ambientais, tais como uso de barragem e recurso hídrico. Os acidentes recentes com barragens no Brasil alteraram significativamente como as barragens são construídas e como elas são monitoradas. Várias empresas atualmente estão monitorando o uso de recursos hídrico, colocando como meta a redução ou controle do uso desse recurso.

O peneiramento em umidade natural é cheio de desafios e a experiência do peneiramento industrial, em âmbito global, mostra que para se alcançar resultados de eficiência, produtividade e qualidade, ao mesmo tempo, tem se tornado necessário superar desafios cada vez maiores.

Na bibliografia sobre o tema existem poucas referências teóricas e científicas a respeito. Muitas vezes as decisões são tomadas com base em referenciais empíricos, experiência prática ou até mesmo com base na “tentativa e erro”. É necessário, portanto, se conhecer mais a fundo os principais mecanismos de peneiramento, as variáveis operacionais e dos equipamentos, e as principais características do sistema particulado que atuam neste tipo de processo.

Por causa do rompimento de barragens no Brasil, crescentes restrições das mais diversas naturezas, do acesso, utilização e depósito em barragens, ou seja, o uso da água pela mineração resulta na necessidade da mudança de patamares tecnológicos e de gestão em vá-

rios segmentos do setor mineral. Portanto, a avaliação do potencial de utilização de novas rotas de processamento a umidade natural, ou controle e redução no consumo de água (etapas de pré-concentração a umidade natural que permitam o descarte antecipado de rejeito grosso, peneiramento a seco, por exemplo) passa a ser uma premissa para as empresas de mineração.

1.4. Justificativa

A pesquisa se justifica segundo critérios financeiros e técnicos.

No aspecto financeiro, a aplicação do peneiramento a seco como escalpe no ROM da britagem primária, irá proporcionar a redução no tamanho, capacidade e manutenção do britador, menor gasto energético devido ao equipamento ser de capacidade menor, zero consumo de água e redução no tamanho do prédio civil.

Ademais, a homogeneização é a operação unitária que vem após a britagem e o peneiramento. Duas pilhas de minério homogeneizado são constituídas e por especificações o processo exige que o minério esteja com o mínimo de umidade para que seja possível confeccionar a pilha de minério com 12 metros de altura.

1.5. Objetivo

1.5.1. *Objetivo Geral*

O trabalho tem como objetivo geral verificar as condições técnicas do peneiramento a seco do minério de nióbio proveniente do depósito alcalino Carbonatítico de Araxá para atender uma nova linha de alimentação do pátio de homogeneização.

1.5.2. *Objetivos específicos*

- Levantar os dados necessários do minério para dimensionamento de peneira;
- Levantar as alternativas e componentes da peneira através de estudos de bibliografia e publicações técnicas para atender o peneiramento específico.
- Dimensionar a etapa de peneiramento;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG) e a Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) constituíram uma sociedade anônima, com gestão compartilhada – a denominada Companhia Mineradora do Pirocloro de Araxá (COMIPA), as duas empresas arrendaram seus direitos de lavra do minério de pirocloro (CBMM, 2022).

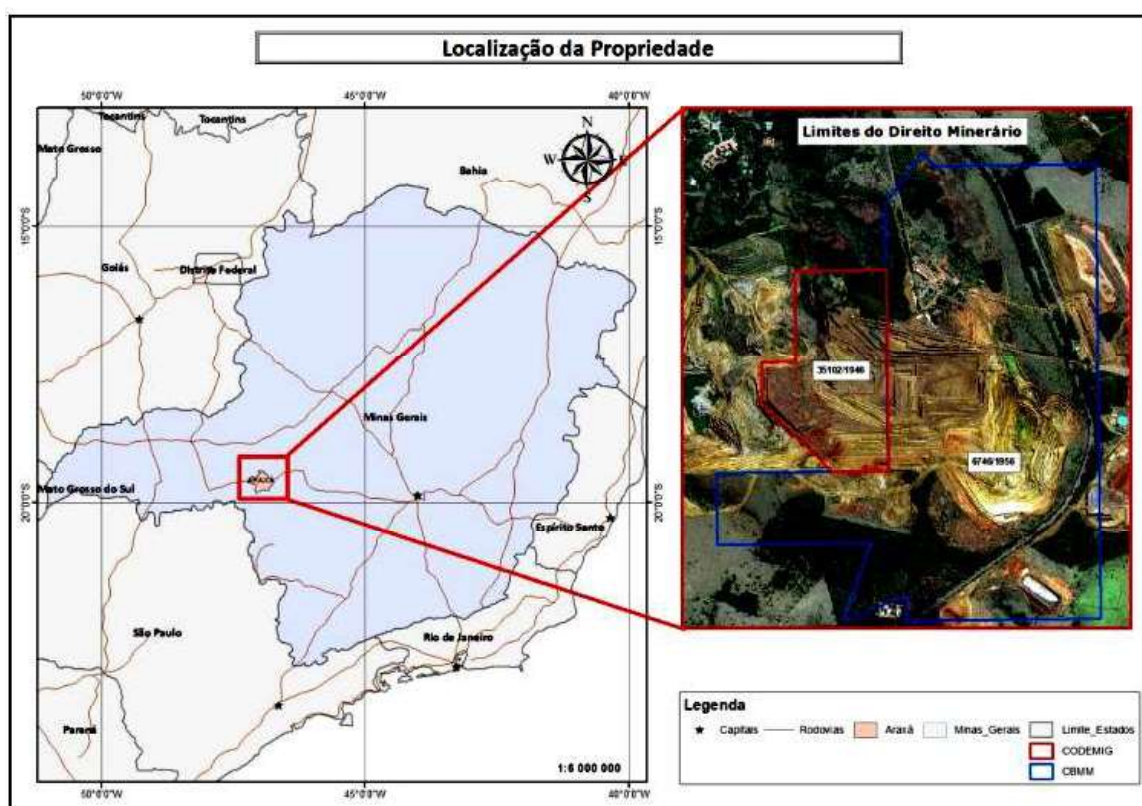
A lavra é realizada por método a céu aberto, por meio de escavadeiras mecânicas, tratores de esteiras e caminhões rodoviários que alimentam um britador primário. Por causa da característica do minério, até então, nenhuma operação de perfuração e desmonte por explosivos se faz necessária. O britador é inserido ao pátio de homogeneização por meio de uma série de correias transportadoras. As instalações de homogeneização consistem em um sistema para empilhamento e posterior retomada até a usina de concentração.

A produção das plantas de concentração consiste em concentrados de nióbio com cerca de 52% de Nb_2O_5 . Este concentrado é utilizado na CBMM como insumo para etapas posteriores como: dessulfuração, defosforação, metalurgia, plantas químicas para produção de óxidos e fornos de feixes de elétrons para obtenção de nióbio metálico. Como produtos finais industrializados têm-se: Ferro-Nióbio Padrão, Óxido de Nióbio e Nióbio Metálico, bem como as ligas especiais: Ferro-Nióbio e Níquel-Nióbio (SILVA, 2019).

2.1. Localização da Jazida

A mina da CBMM localiza-se a aproximadamente 10 km ao sul da cidade de Araxá, Minas Gerais. A área está geologicamente inserida no Complexo Alcalino Carbonatítico de Araxá, como indicado na Figura 6.

Figura 6: Localização da cidade de Araxá e vista aérea da Mina de Nióbio com os limites dos decretos minerários



Fonte: SILVA. (2019)

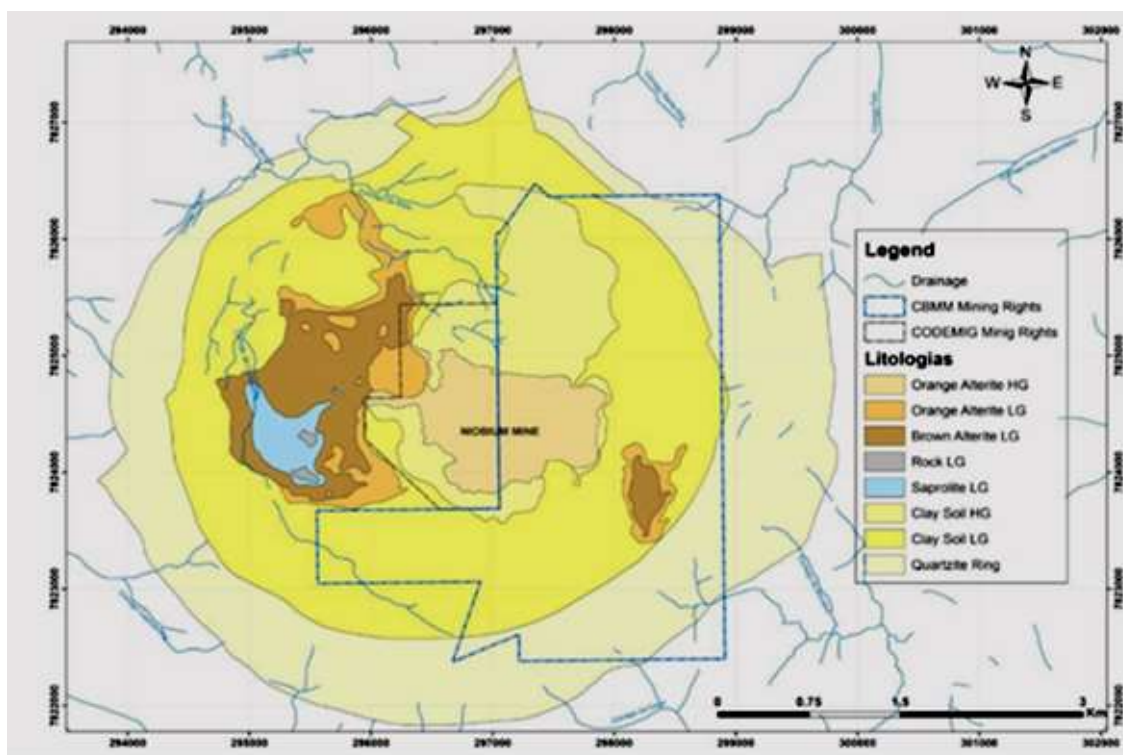
2.2. Geologia local

De acordo com Grasso (2015), os sedimentos do Grupo Araxá sofreram metamorfismo regional de baixo grau e são compostos por quartzitos e clorita/moscovita e xistos. Nesse contexto as rochas hospedeiras foram dobradas, sofrendo assim intenso fraturamento e com

evidências de recristalização, silicificação e alteração metassomática. Em escala regional, os falhamentos afetaram as rochas hospedeiras e também as rochas do Complexo Carbonatítico, a orientação predominante foi noroeste ou nordeste e com deslocamentos verticais acima de 100 metros em alguns lugares.

O complexo alcalino-Carbonatítico de Araxá é aproximadamente circular e possui cerca de 4,5 km de diâmetro, a Figura 7 apresenta o mapa Geológico do complexo carbonatítico de Araxá, datações desta intrusão indicaram idade de $89,4 \pm 10,1$ Milhões de anos (SONOKI e GARDA, 1988) e está associada a corpos intrusivos contemporâneos registrados em outras partes da área de Araxá. A intrusão levou a uma maior deformação estrutural das rochas hospedeiras já metamorfizadas com desenvolvimento de estruturas dômicas e padrões de fratura radial na encaixante (TRAVERSA et al., 2001). O complexo está metassomatizado e é formado por flogopititos cortados por necks, plugs e veios carbonatíticos, também por veios e diques de apatitito, nelsonito, magnetitito e de barita (TORRES, 1996).

Figura 7: Mapa Geológico do Complexo Carbonatítico de Araxá



Fonte: SILVA. (2019)

De acordo com Braga Júnior e Biondi (2023), o Complexo Carbonatítico de Araxá é uma importante fonte de depósitos minerais, incluindo Nióbio, Fósforo, Barita e Ferro. Estes

depósitos foram formados pelo intemperismo de rochas ricas em flogopita e carbonatito de norsetita. Assim os principais tipos de minérios são minério cor de ferrugem, minério laranja e minério marrom. O minério cor de ferrugem, o minério cor marrom e o minério laranja são mineralizados em pirocloro. Esse processo de intemperismo em 100 metros de rocha resultou em 33 metros de minério laranja, 9 metros de minério marrom e 4 metros de minério cor de ferrugem no núcleo do complexo e 35 metros de minério laranja, 7 metros de minério marrom e 10 metros de minério cor de ferrugem no anel formado em torno do núcleo.

Bilhões de toneladas de vários tipos de minério são extraídos da terra todos os anos e são processados por diversos métodos de beneficiamento para se tornarem úteis à humanidade. Pode-se assim dizer que a grande maioria desses materiais passa sobre superfícies de peneiramento (ALLIS-CHALMERS, 1953).

As chamadas peneiras vibratórias foram introduzidas durante a década de 1910. Porém eram simples e compostas por chassis de aço, que lhes permitiam o encaixe de algum tipo de superfície de peneiramento e para dar o efeito de vibração, em suas laterais, eram inseridos eixos passantes com contrapesos que rodavam. Eram constituídas basicamente de dois ou quatro rolamentos e possuíam movimento circular. A rotação desses eixos causava vibrações no chassis, dando origem às primeiras peneiras vibratórias. No entanto, de 1920 e começo dos anos 30, o desenho dos chassis e os mecanismos de vibração apresentaram melhorias consideráveis, sendo que, na década de 1940, as peneiras vibratórias passaram a serem equipamentos de grande importância nas usinas de beneficiamento e seus processos (BOND, 1961).

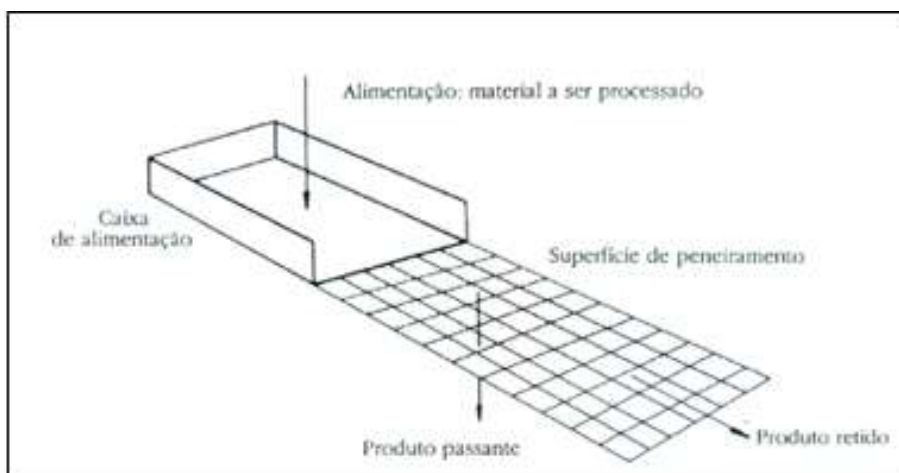
Atualmente, as peneiras vibratórias são bastante utilizadas em instalações de beneficiamento tanto para mineração que busca a concentração de minerais como em pedreiras, para produção de britas na construção civil. Por serem vibratórias, as peneiras são equipamentos mecânicos constantemente exigidos e por isso mais suscetíveis à falha mecânica. Assim, por essa particularidade, as peneiras requerem muito cuidado com relação a operação e nas manutenções (preventiva, corretiva e preditiva). A escolha correta do modelo, tela e do tamanho da peneira é fundamental para a eficiência de todo o processo (NUNES FILHO, 2017).

2.3. Fundamentos do Peneiramento

O peneiramento é um método de separação por tamanho, compreendendo duas ou mais classes, possuindo um limite superior e inferior (CORREIA, 2010).

De acordo com Chaves e Peres (2012), o peneiramento consiste na operação de separação de uma população de partículas em duas frações de tamanhos diferentes entre si, mediante a sua apresentação a um gabarito de abertura fixa predeterminada, conforme esquematizado na Figura 8. Cada partícula tem duas possibilidades, passar ou ficar retida no gabarito. Os dois produtos chamam-se *oversize*; ou retido, e *undersize*; ou passante. Os gabaritos podem ser grelhas de barras paralelas, telas de malhas quadradas, retangulares, alongadas, telas de fios paralelos, chapas perfuradas ou placas fundidas com furos.

Figura 8: Balanço de Massa



Fonte: Faço. (1994)

De acordo com Sales (2020), o peneiramento industrial, via de regra, opera-se com elevadas vazões de minério. As capacidades dos equipamentos podem variar desde os menores, 10 t/h, podendo-se ultrapassar até 5.000 t/h, nesse caso usa-se as grelhas primárias.

2.4. Mecanismo do peneiramento

O funcionamento de uma peneira e o comportamento das partículas devem ser considerados de dois pontos de vista: o do conjunto de partículas e o de cada partícula individualmente (CHAVES e PERES, 2012).

2.4.1. *Comportamento coletivo*

De acordo com Chaves e Peres (2012), para ocorrer o peneiramento uma peneira essa deve exercer três ações independentes e distintas sobre a população de partículas que é alimentada a ela:

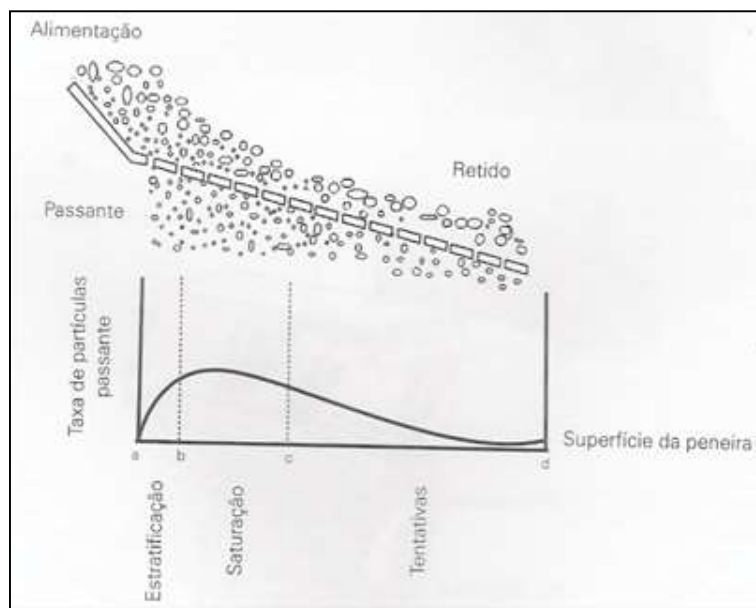
1ª Ação – transportar as partículas de uma extremidade do *deck* até a outra.

2ª Ação – estratificar o leito de modo que as partículas maiores fiquem por cima e as menores por baixo, garantindo a chance dessas partículas de se apresentarem à tela e passarem através dela.

3ª Ação – peneiramento propriamente dito, que consiste na passagem de partículas pelas aberturas da tela.

De acordo com Valadão e Araújo (2012), um mecanismo bastante importante para a separação é a estratificação da camada de material, onde as partículas menores tendem a escapar pelos espaços vazios entre as partículas maiores, a Figura 9 exemplifica essa ação.

Figura 9: Comportamento coletivo.



Fonte: Valadão e Araújo. (2012)

Três situações podem ser identificadas segundo Chaves e Peres (2012), (1) situação inicial, em que a estratificação ainda está ocorrendo; (2) o peneiramento de saturação, quando o leito está totalmente estratificado e (3) o peneiramento de baixa probabilidade, em que as partículas finas remanescentes têm que fazer tentativas repetidas até conseguirem atravessá-la. A Figura 10 mostra regiões chaves no peneiramento.

Figura 10: Mecanismos de peneiramento.

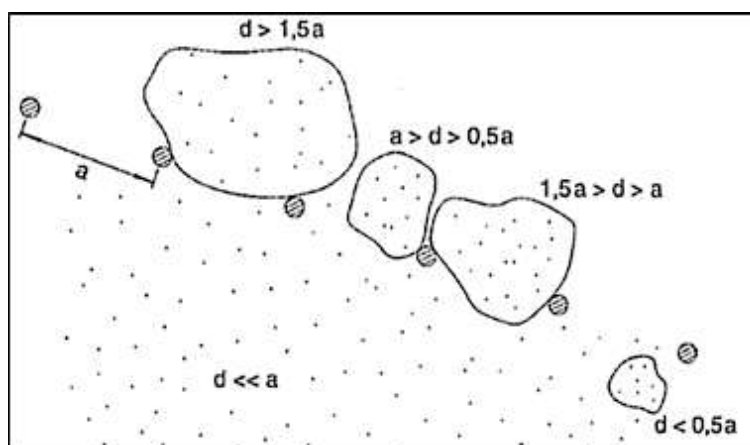


Fonte: WILLS. (2006)

2.4.2. Comportamento individual das partículas

De acordo com Chaves e Peres (2012), as partículas e a abertura da tela se relacionam segundo a granulometria, como ilustra a Figura 11.

Figura 11: Comportamento individual das partículas.



Fonte: Chaves e Peres. (2012)

Na Figura 11, as partículas menores que a abertura da tela e maiores que a metade dela ($a > d > 0,5a$) têm menos oportunidade de atravessar a malha da tela quando comparado com as partículas de tamanho inferior a abertura da tela. Pode-se comparar a situação dessas partículas com a bola de basquete quando lançada no cesto, que só passa por dentro do cesto quando cai em um posicionamento favorável, assim estas partículas só conseguem passar pela abertura da tela quando entram em contato com esta abertura em um posicionamento favorável. Na prática uma quantidade grande de tentativas precisa ocorrer e mesmo assim, existe a possibilidade de uma quantidade expressiva destas partículas irem para o *oversize*. Esta é a faixa granulométrica no peneiramento considerada crítica e interfere diretamente na capacidade e na eficiência da peneira.

As partículas que ficam encrustadas nas aberturas das telas e acabam obstruindo-as são $a < d < 1,5a$. As dimensões destas partículas são similares às aberturas da tela e por causa desta similaridade, as partículas ficam agarradas nas aberturas. Se o número de aberturas com partículas agarradas for, por exemplo, próximo de 30%, certamente ocorrerá redução da capacidade da peneira. Uma solução para essa ocorrência é alterar a amplitude e a frequência da peneira.

As partículas maiores que 1,5 abertura da tela, ($d > 1,5a$), normalmente percorrem a peneira por cima da tela e são direcionadas para o *oversize*. Estas partículas não afetam o desempenho do peneiramento, uma exceção é se ocorrerem em grandes quantidades, pois podem causar danos a estrutura física da tela, devido ao seu tamanho e densidade ou acentuar o seu desgaste. Nesse caso, um *deck* auxiliar ou de alívio é recomendado.

As partículas que possuem dimensões com tamanhos inferiores a 50% da abertura da tela ($d < 0,5a$) atravessam-na com facilidade e não causam nenhuma perda na eficiência da peneira.

Geralmente partículas com dimensões denominadas ultrafinas ($d \lll 0,5a$), poeiras e lamas, deveriam passar pelas aberturas das telas sem nenhuma dificuldade, como no caso anterior. No entanto, este fato é observado somente em parte destas partículas. Isto ocorre porque elas possuem uma área superficial representativa e assim, essas partículas acabam aderindo às partículas com dimensões superiores e são encaminhadas para o *oversize*, causando contaminação no mesmo. Na prática as partículas ultrafinas se dividem tanto para o *oversize* como para o *undersize*.

As partículas com diâmetros (d) superiores a uma vez e meia ($1,5$) a abertura da tela (a) não influenciam no resultado do peneiramento, bem como àquelas inferiores à metade ($0,5$) da abertura da tela. As partículas compreendidas entre esta faixa é que constituem a classe crítica de peneiramento e influem fortemente na eficiência e na capacidade das peneiras (CARRISSO; CORREIA, 2004).

2.5. Eficiência de peneiramento

Segundo Wills (2006), a eficiência de peneiramento é determinada pelo “grau de perfeição” de separação do material em frações de tamanho acima ou abaixo das dimensões da abertura da peneira. A eficiência revela o grau de funcionamento do equipamento, em relação à separação granulométrica ideal desejada. Pode ser definida, portanto, como a relação entre o

montante de grãos mais finos que o espaçamento da tela de peneiramento e que a atravessam e a quantidade deles na alimentação, conforme Equação 1.

$$E = (P / Aa) \times 100\% \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

E = eficiência;

P = fluxo passante (t/h);

A = alimentação (t/h);

a = porcentagem de material menor que a malha de alimentação.

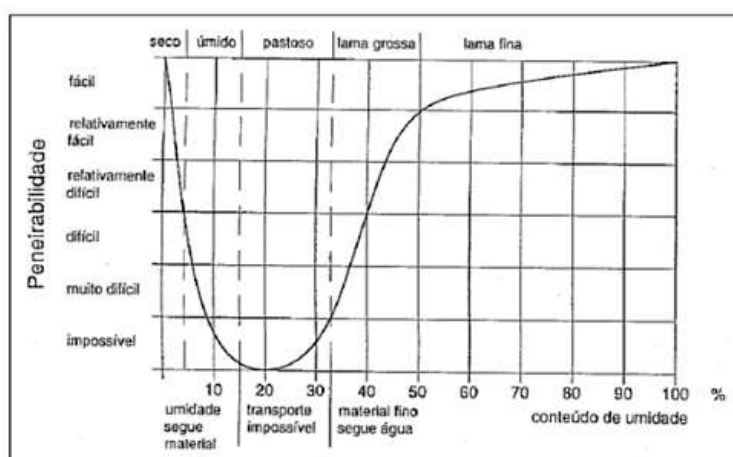
No meio industrial o peneiramento possui uma eficiência de 80% a 95%.

2.6. Efeitos da umidade no peneiramento a seco

De acordo com Sales (2020), os sistemas particulados, via de regra, carregam entre as partículas que os constituem, determinada quantidade de água de “forma natural”, e a inclusão desta água juntos às partículas minerais, pode ocorrer devido a diversos fatores, tais como: águas do nível freático e subterrânea, água das chuvas, a própria água presente na atmosfera (umidade do ar), porosidade, etc. Sendo assim, os minerais têm diferentes níveis de afinidade com a água, que em propriedade das interfaces, define-se como hidrofobicidade ou hidrofilicidade. A esta quantidade de água adquirida via fenômenos naturais conhecida por “umidade natural”, uma vez que não houve a adição “proposital” de água ao material. O processamento dos minérios a umidade natural é via de regra denominado de “processamento a seco”, embora o material não tenha passado por processo de secagem. Processos em plantas de mineração, tais como, a britagem, alguns peneiramentos, estocagem em silos, caçambas de caminhões e vagões tem como regra geral ser processado a seco ou com umidade natural.

De acordo com Chaves e Peres (2012), partindo do material seco e aumentando a umidade do material o peneiramento vai se tornando cada vez mais difícil até praticamente impossível, entre 5% e 8%, o peneiramento vai se tornar possível somente após uma quantidade de água acima de 60%. De acordo com a Figura 12 pode-se observar a faixa de peneiramento possível e impossível de acordo com a umidade, o gráfico evidencia a correlação qualitativa entre a peneirabilidade, definida como a facilidade ou dificuldade de peneiramento, e a porcentagem de umidade no minério. Nota-se que até 2% e acima de 50% de umidade a peneirabilidade é fácil. Na faixa entre esses dois valores o peneiramento é considerado de relativamente difícil a impossível. Entre as porcentagens de umidade de 15% até 25% chama-se de zona impossível ou umidade crítica.

Figura 12: Efeitos da umidade sobre o peneiramento



Fonte: Chaves e Peres. (2012)

A água na superfície exerce em efeito capilar aproximando as partículas e mantendo-as juntas e ainda fazendo as partículas mais finas aderirem-se às partículas maiores. Isto impede as partículas aglomeradas de encaminharem-se ao produto adequado, prejudicando a eficiência do peneiramento (CHAVES e PERES, 2012).

A Figura 12 mostra o gráfico clássico da correlação qualitativa entre a peneirabilidade, aqui definido como a facilidade ou dificuldade de peneiramento, e o conteúdo de umidade do minério. A capacidade específica do peneiramento (CE) ou peneirabilidade é calculada considerando a altura de camada sobre o *deck* da peneira (B_d) remanescente e o tempo de ensaio para atingir uma eficiência de 90%. A zona de peneiramento impossível é denominada de umidade crítica (NUNES FILHO, 2017).

Conforme Peralta (2013) o efeito da umidade é especialmente sensível quando há grande quantidade de partículas finas. Como a área específica destas partículas é muito grande, a umidade de superfície é relativamente maior que a das demais. Nessas circunstâncias o peneiramento torna-se difícil de ser realizado.

A eficiência do peneiramento conduzido com umidade natural será afetada por duas principais razões. A primeira razão é o fenômeno de cegamento, causado pelas partículas úmidas e muito finas que aderem progressivamente aos fios da malha, em especial nos cantos, até que no limite obstruem completamente a abertura, impedindo a passagem do minério. A segunda razão é o efeito da cobertura de partículas aderidas umas às outras, causando um efeito de cimentação e impedindo as partículas aglomeradas de encaminharem-se ao produto adequado, prejudicando assim a eficiência do peneiramento (CHAVES e PERES, 2012).

Peneiramento a seco ou peneiramento “a umidade natural”, como tem sido comumente tratado na atualidade, é sabidamente conhecido por ser fortemente influenciado pelos efeitos das variações da umidade. Na prática, observa-se também que quanto menor a abertura, ou o tamanho de separação, maior a dificuldade de peneiramento (NUNES FILHO, 2017).

Dois autores fazem uma delimitação entre umidade e faixa granulométrica, onde eles delimitam até qual faixa se é possível peneirar em umidade natural, sendo:

Os peneiramentos industriais em umidade natural são realizados, normalmente, em frações granulométricas de até 6 mm. Entretanto, é possível peneirar em umidade natural com eficiência razoável em frações de até 1,7 mm. A úmido, o peneiramento industrial é normalmente aplicado para até 0,4 mm, mas, recentemente tem sido possível peneirar partículas mais finas, da ordem de 50 μm (CARRISSO; CORREIA, 2004).

No peneiramento a seco, o material apresenta somente a umidade natural. Sua aplicação acontece para materiais maiores que 5 mm. O peneiramento a úmido tem sua utilização para materiais de granulometria menor que 0,25 mm. O peneiramento de partículas de grande tamanho utiliza maiores amplitudes e baixa frequência. Já o peneiramento de finos é realizado em alta frequência e baixa amplitude (WILLS, 2006).

As novas técnicas de movimento elíptico, combinadas com o aumento da aceleração e o uso das telas autolimpantes, têm se mostrado bastante eficazes para os peneiramentos que antes eram considerados impossíveis (NUNES FILHO, 2017).

2.7. Tipos de peneiras

Em relação aos tipos de peneiras industriais empregadas no setor mineral, pode-se classificá-las tanto de acordo com sua função quanto a partir de suas características mecânicas. As sete classes a seguir resumem as principais aplicações:

1) Peneiras escarpadoras: geralmente aplicadas para escalpe de finos. Peneiram o ROM, antecedem os britadores primários e podem também ser denominadas de “grelhas”;

2) Peneiras “bananas” ou modulares: possuem três ou mais planos de inclinação distintos ao longo do *deck*. Geralmente são aplicadas em materiais com grande quantidade de finos. São projetadas para fornecer eficiências de peneiramento distintas ao longo do *deck*;

3) Peneiras vibratórias convencionais: são as mais utilizadas na indústria de mineração. Podem ser inclinadas ou horizontais, podendo ter movimento linear, como no caso das peneiras horizontais, ou movimentos circulares ou elipsoidais, como no caso das peneiras vibratórias inclinadas;

4) Peneiras desaguadoras: função de desaguamento de polpas de produtos ou rejeitos das plantas de beneficiamento. São horizontais ou levemente inclinadas negativamente. A altura da camada de minério (altura do *cake*) é um parâmetro muito importante para a geração de um produto com baixa umidade;

5) Peneiras de alta frequência: aplicadas a peneiramento superfino, granulometria próxima ou menor que 0,15 mm. Utilizam telas especiais e aplicação direta de vibração, consideradas de alto custo;

6) Peneiras rotativas ou “*trommel*”: associadas geralmente a moinhos cilíndricos. Também possuem a forma de um cilindro, no qual a alimentação é direcionada pela parte in-

terna, retendo internamente as partículas de *oversize*, ao longo do trajeto, e ao mesmo tempo possibilitando a passagem, por entre as aberturas das telas, das partículas de *undersize*;

7) Peneiras estáticas (fixas): encontradas normalmente como grelhas fixas, antes de britadores primários, sendo utilizadas, neste caso, para proteger os britadores primários contra matacões. Podem ser aplicadas também em projetos mais simples, como no caso do peneiramento de areias de aluvião (MILHOMEM, 2013). Também existem as peneiras do tipo DSM, utilizadas para peneiramento fino.

Segundo Chaves e Peres (2012), o transporte do material sobre as peneiras vibratórias é assegurado pelo movimento da peneira. Esse movimento é causado pela amplitude e frequência da peneira.

Conforme Metso Minerals (2005), a vibração é produzida geralmente por mecanismos vibratórios, baseados em massas excêntricas com amplitude de 1,5 mm a 6 mm, operando numa faixa de 700 rpm a 1.000 rpm.

A amplitude deve dar um impulso a cada partícula, sendo capaz de levantá-la e lançá-la à frente. Essa amplitude tem também a função de lançar as partículas de tamanho entre 1,5 a e a para fora da abertura, impedindo-as de entupir a tela. A frequência de vibração tem como função estratificar o material sobre o leito, fazendo com que as partículas finas fiquem por baixo e se apresentem à tela e assim possa atravessá-la. A inclinação da peneira afeta vários parâmetros da operação, por exemplo:

- Vazão: quanto mais inclinada, maior a vazão e a capacidade de alimentação;
- Altura do leito: quanto maior a inclinação, menor a altura da camada de *oversize*.

Na prática industrial, o peneiramento pode ser realizado a seco ou a úmido. O peneiramento é dito “a seco” quando é efetuado com o material na sua umidade natural e “via úmida” quando o material é alimentado junto com água formando uma polpa ou recebe água adicional através de *sprays* convenientemente dispostos sobre os *decks* de peneiramento (CHAVES e PERES, 2012).

O peneiramento a seco pode ser conduzido com frações de tamanhos até 75 μm , mas tamanhos menores tendem a entupir as aberturas da peneira, reduzindo a eficiência do processo (WILLS, 2006).

2.8. Tipos de grelhas e peneiras

Atualmente existem no mercado uma variedade grande de modelos e tamanhos de grelhas e peneiras (WILLS, 2006).

De acordo com Carrisso e Correia (2004), os equipamentos utilizados na indústria para o peneiramento podem ser divididos em três tipos, sendo as grelhas, crivos e telas. Esses equipamentos podem ser classificados em duas categorias de acordo com o seu movimento, sendo elas fixas e móveis.

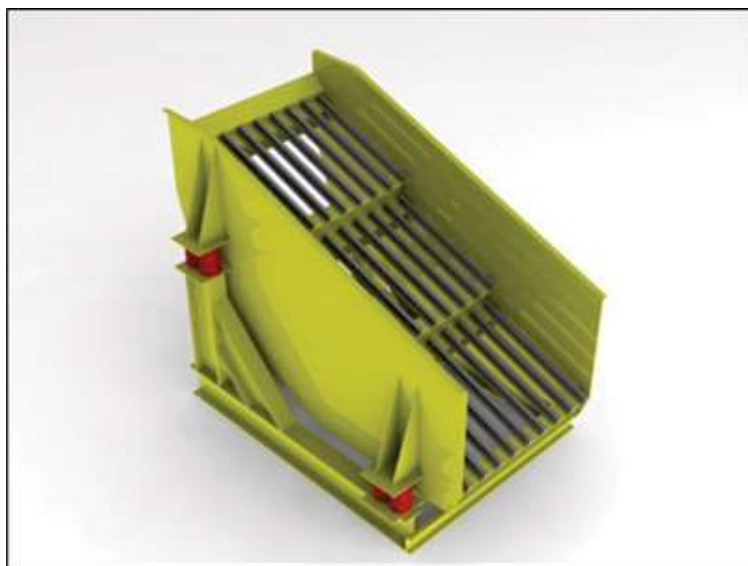
A seguir estão listados alguns desses modelos e um breve descritivo de sua função dentro do processo de beneficiamento mineral.

2.8.1. *Grelhas de Barras Fixas*

Nas peneiras ou grelhas “fixas”, a única força atuante sobre o material é a força de gravidade e por isso esses equipamentos possuem superfície inclinada.

De acordo com Correia e Couto (2012), as grelhas fixas são compostas de barras fixas ou trilhos equidistantes paralelamente por um valor pré-determinado, apoiados numa estrutura de suporte com inclinação entre 35° e 45° com comprimento na direção do fluxo. São muito comuns os trilhos paralelos e horizontais, usados como proteção para evitar que grandes blocos gerados durante a detonação na mina eventualmente adentrem ao britador primário e causem engaiolamentos e perda de produção. A Figura 13 apresenta a imagem de uma grelha fixa.

Figura 13: Grelha fixa inclinada



Fonte: SHAH, K. P. (2018)

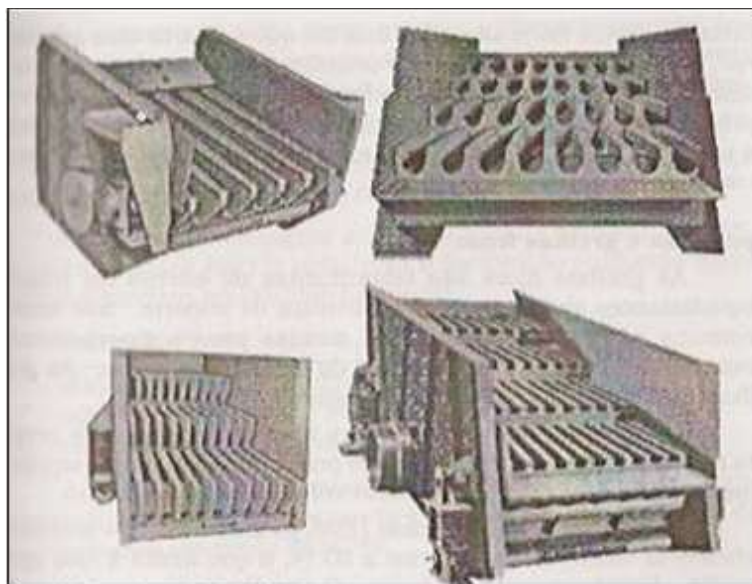
2.8.2. *Grelhas Vibratórias*

As grelhas vibratórias são equipamentos extremamente robustos, pois recebem o minério ROM, que pode ter matacões pesando algumas toneladas. O comprimento desses equipamentos é encurtado para aumentar a resistência à flexão e evitar danos prematuros e a inclinação é aumentada para auxiliar o rolamento dos blocos para frente (CHAVES e PERES, 2012).

O objetivo de sua instalação não é uma separação eficiente dos finos e dos grossos, mas desviar certa quantidade de finos do britador e, assim, evitar abrasão e desgaste do mesmo. Assim, a eficiência é uma consideração secundária e as grelhas vibratórias trabalham com esse parâmetro entre 60% e 70% (CHAVES e PERES, 2012).

A Figura 14 apresenta a imagem de uma grelha vibratória na fase final do processo de fabricação.

Figura 14: Grelha Vibratória.



Fonte: Chaves e Peres. (2012)

2.9. Peneiras vibratórias

As peneiras vibratórias são classificadas em três tipos: inclinadas, horizontais e de alta frequência (VALADÃO e ARAÚJO, 2012).

Quanto à vibração as peneiras vibratórias podem ser divididas em duas categorias: aquelas em que o movimento vibratório é praticamente retilíneo, num plano normal à superfície de peneiramento (peneiras vibratórias horizontais); e aquelas em que o movimento é circular ou elíptico, neste mesmo plano (peneiras vibratórias inclinadas) (LUZ et al, 2010).

2.9.1. Peneiras vibratórias inclinadas

As peneiras vibratórias inclinadas são constituídas por um chassi robusto, apoiado sobre molas, um mecanismo acionador do movimento vibratório, contendo um, dois, três e eventualmente até quatro patamares de suportes para as telas, denominados de “*deck*” (CHAVES e PERES, 2012). A Figura 15 apresenta exemplo deste tipo de equipamento.

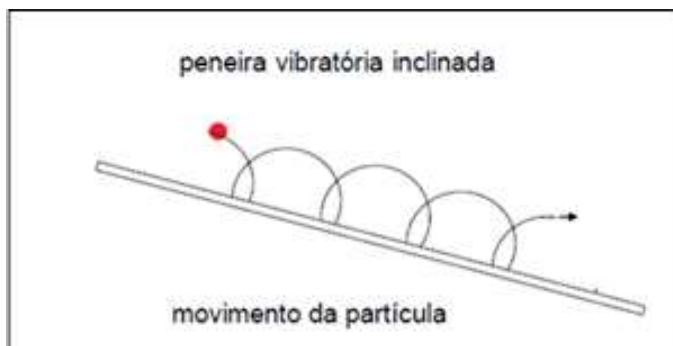
Figura 15: Peneira Vibratória



Fonte: Metso Mineração. (2018)

Peneiras vibratórias inclinadas têm inclinações variando entre 15° e 35° e transportam o material do leito a uma velocidade de 18 a 36 m/min, dependendo da inclinação (CHAVES e PERES, 2012). O movimento vibratório das peneiras inclinadas é definido como circular ou elíptico. A Figura 16 representa o movimento da partícula na superfície da peneira.

Figura 16: Movimento da partícula.



Fonte: Valadão e Araújo. (2012)

Neste movimento as partículas tendem a desenvolver um estado fluido e são lançadas para cima e para frente, de modo que possam se apresentar à tela várias vezes, sempre sobre aberturas sucessivas. Além do transporte do material, a vibração também gera a “estratificação” do conjunto de partículas sobre a tela, formando um leito de partículas maiores sobreposto ao leito de partículas menores em tamanho (CHAVES e PERES, 2012).

2.9.2. Peneiras vibratórias horizontais

As peneiras vibratórias horizontais, ilustradas na Figura 17, têm um movimento vibratório retilíneo (ou linear). A velocidade de transporte do material compreende em torno de 12 m/min a 18 m/min, a peneira dispõe de uma vibração que atua na direção paralela ao fluxo do material para realizar o transporte do mesmo (VALADÃO e ARAÚJO, 2012).

Figura 17: Peneira Vibratória horizontal.



Fonte: (HAVER & BOECKER. (2019)

A altura de lançamento das partículas é menor que a da peneira inclinada, o que inibe a utilização de aberturas tão grandes quanto. Por tudo isto é necessário um movimento diferente (CHAVES e PERES, 2012), conforme ilustra a Figura 18.

Figura 18: Movimento da partícula horizontal.



Fonte: Valadão e Araújo. (2012)

2.10. Peneiras moduladas ou Banana Screns

De acordo com Nunes Filho (2017), as peneiras bananas frequentemente são encontradas em minerações, tanto para função de escalpe e quanto para separação por tamanhos propriamente dita, conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19: Peneira tipo Banana



Fonte: Direct Industry. (2018)

As chamadas *Banana screens* ou simplesmente peneiras do tipo “banana” são peneiras modulares que se caracterizam por zonas com inclinações diferentes: na alimentação de 24° a 45° , na parte intermediária de 8° a 24° e na descarga com 0° a 8° .

Essas diferenças ou módulos com distintas inclinações têm como objetivo aumentar a recuperação do passante na zona de alimentação (SHAH, 2018).

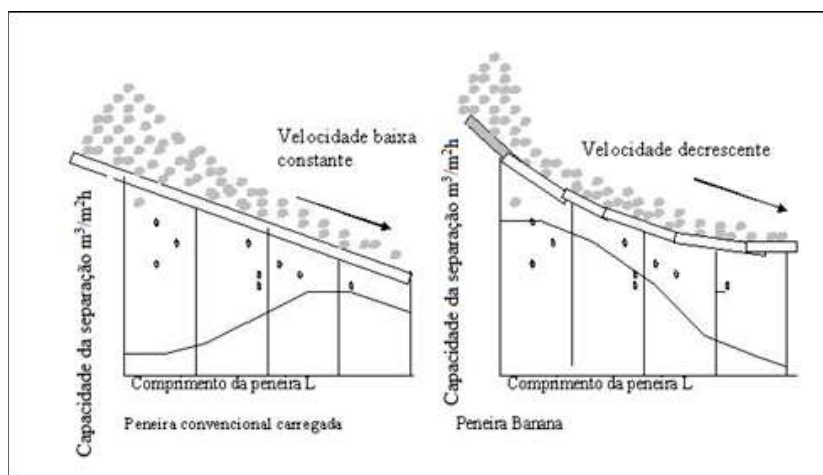
A inclinação do *deck* afeta a altura do leito, e o ideal seria poder aumentar a inclinação até ter um leito cuja espessura fosse de uma única partícula, pois, dessa forma, o peneiramento seria imediato. No entanto, isso seria inconveniente, pois as partículas passariam demasiadamente rápidas pela malha. Assim, as partículas mais difíceis de peneirar não teriam tempo suficiente para serem peneiradas (CHAVES e PERES, 2012).

Segundo Sales (2020), devido à maior inclinação no início do processo, a altura de camada é diminuída significativamente, acelerando a estratificação granulométrica das partículas, o que aumenta a taxa de passagem das partículas finas. Esse fenômeno justifica a aplicação deste tipo de peneira para minérios que contém considerável quantidade de finos.

Nas regiões seguintes a velocidade de escoamento diminui o que faz aumentar a probabilidade de passagem das partículas finas, aumentando, portanto, a eficiência de peneiramento. Neste momento o peneiramento também é facilitado pela menor altura de camada sobre o *deck*. A última região (3º módulo, para o caso de peneiras de 3 módulos), é caracterizada pela presença de grande proporção de partículas, cujo tamanho é próximo ao da abertura da tela (também conhecidas como “*nearsized*”). Desta forma, pode-se concluir que a combinação de regiões com inclinações decrescentes no *deck*, ao longo do sentido do escoamento, favorece uma maior eficiência de peneiramento.

A Figura 20 apresenta um comparativo entre peneira vibratória inclinada convencional e peneira banana, onde se pode ilustrar as diferenças nas vazões passantes ao longo do comprimento do *deck* das peneiras.

Figura 20: Gráficos comparativos entre as vazões passantes em uma peneira vibratória inclinada convencional e uma peneira banana.



Fonte: Sales. (2020)

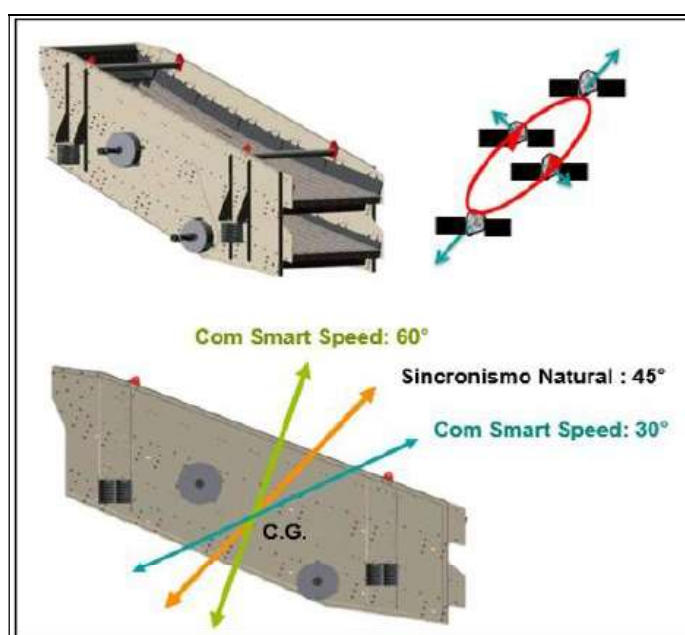
Dessa forma, a eficiência do peneiramento aumenta e com o movimento retilíneo a área de peneiramento é reduzida com relação à peneira vibratória inclinada em 40% (CHAVES e PERES, 2012).

O movimento das partículas na peneira banana é linear, proporcionado pelo mecanismo vibratório de caixa de engrenagens. Como vantagem desse movimento estão a maior velocidade de transporte e, conseqüentemente, a maior capacidade de peneiramento. No entanto, as partículas recebem forças apenas em uma direção, o que resulta em maior probabilidade de entupimento.

2.11. Peneira Banana com movimento elíptico

O movimento elíptico é um intermediário entre o circular e o linear, que conciliou o benefício da baixa tendência ao entupimento proveniente do movimento circular com a maior capacidade proveniente do movimento linear. A peneira elíptica ainda pode trabalhar com qualquer inclinação de *deck*, resultando em maior flexibilidade de operação. Portanto, a peneira elíptica permite controlar o tempo de peneiramento do material sobre o *deck*, ou seja, pode-se variar o ângulo de lançamento das partículas em período com minério úmido ou em período com minério seco (NUNES FILHO, 2017). A Figura 21 apresenta uma ilustração da peneira elíptica, com indicação das forças atuantes nas partículas e os respectivos ângulos.

Figura 21: Peneira banana com movimento elíptico



Fonte: Nunes Filho. (2017)

Essa descrição refere-se a peneiras elípticas fabricadas pela Metso Minerals. O sistema de vibração de peneiras fabricadas por outros fornecedores é geralmente diferente.

2.12. Peneiras Rotativas

Peneiras rotativas (*trommel*) possuem a superfície de peneiramento cilíndrica ou ligeiramente cônica, revestido por uma tela, que gira em torno do eixo longitudinal. O eixo possui uma inclinação que varia entre 4° e 10° , dependendo da aplicação e do material nele utilizado. A alimentação é feita na extremidade superior, o material vem rodando e descendo, as partículas mais finas que a tela atravessam, enquanto as mais grossas ficam retidas, sendo descarregadas na extremidade inferior. A Figura 22 ilustra uma peneira rotativa. A operação geralmente é feita a úmido, com jatos d'água sobre a tela (CHAVES e PERES, 2012).

Figura 22: Peneira Rotativa.



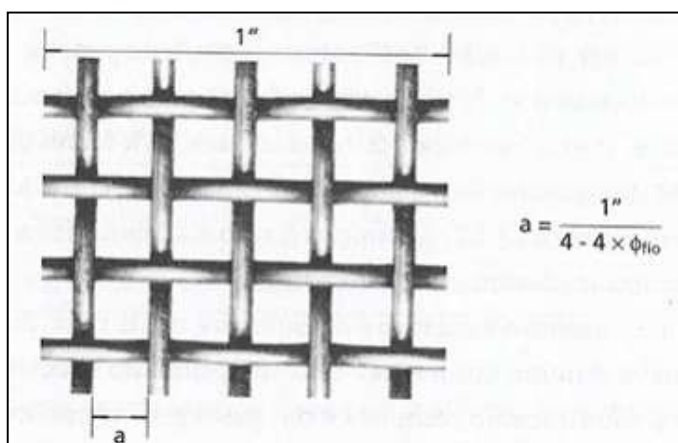
Fonte: WURDINGER MANUFACTURING. (2018)

2.13. Tipos de telas

Uma variável muito importante na definição da peneira é o tipo de tela a ser empregada. Vários fatores precisam ser levados em conta para a seleção apropriada do tipo de tela, incluindo: resistência ao desgaste, exigências na precisão da separação, tamanho máximo de alimentação, custos, entre outros.

Segundo Chaves e Peres (2012), a abertura das telas em uma peneira é dada em polegadas ou frações da mesma, em mm ou em número “*mesh*”, sendo que esse último é dado pelo número de aberturas que tem no comprimento de 1” de tela. Assim sendo, em uma malha de 4# cada abertura é de 4,7 mm de acordo com Figura 23.

Figura 23: Malha de número #4.



Fonte: CHAVES e Peres. (2012).

A Tabela 1 apresenta comparação das séries americanas ASTM / ASA / USS e da norma brasileira ABTN-NBR NM-ISO 3310- 1:2010, juntamente à série Tyler.

Tabela 1: Séries Tyler, ASTM / ASA / USS e ABNT-NBR NM-ISO 3310-1:2010

Malha (mm)	Tyler (Mesh)	ASTM/ASA/USS (Pol)	ABNT-NBR NM-ISSO 3310-1:2010 (mm)
101,6		4	
88,9		3 1/2	
76,2		3	76,0
63,5		2 1/2	
50,8		2	50,0
44,4		1 3/4	
38,1		1 1/2	38,0
31,7		1 1/4	
25,4		1	25,0
19,1		3/4	19,0
15,9		5/8	
12,7		1/2	
9,52		3/8	9,50
7,93		1/3	
6,35		1/4	
5,66	3,5	3 1/2	
4,76	4	4	4,80
4	5	5	
3,36	6	6	
2,83	7	7	
2,38	8	8	2,40
2	9	10	2,00
1,68	10	12	
1,41	12	14	
1,19	14	16	1,20
1	16	18	
0,84	20	20	
0,71	24	25	
0,59	28	30	0,60
0,5	32	35	
0,42	35	40	0,42
0,350	42	45	
0,297	48	50	0,300
0,250	60	60	
0,210	65	70	
0,177	80	80	
0,149	100	100	0,150
0,125	115	120	
0,105	150	140	
0,088	170	170	
0,074	200	200	0,075
0,062	250	230	
0,053	270	270	
0,044	325	325	
0,037	400	400	

Fonte: Chaves e Peres. (2012)

Telas de peneiramento são normalmente fabricadas em aço, borracha ou poliuretano, e podem ser classificadas em função de seu tipo de encaixe sobre a peneira: aparafusadas,

tensionadas, modulares de encaixe rápido etc. (WILLS, 2006). A seguir há uma breve descrição dos principais tipos de telas.

2.13.1. Telas com fio de aço

As malhas de fio traçado são os meios de peneiramento considerados mais importantes, mas o grande desafio construtivo é fabricá-las de modo que as malhas não se abram quando alimentada, por esse motivo elas são soldadas nos contatos entre os fios (CHAVES e PERES, 2012). A Figura 24 apresenta esse tipo de tela.

Figura 24: Chapas de aço com aberturas retangulares.



Fonte: Wills. (2006)

2.13.2. Telas de borracha

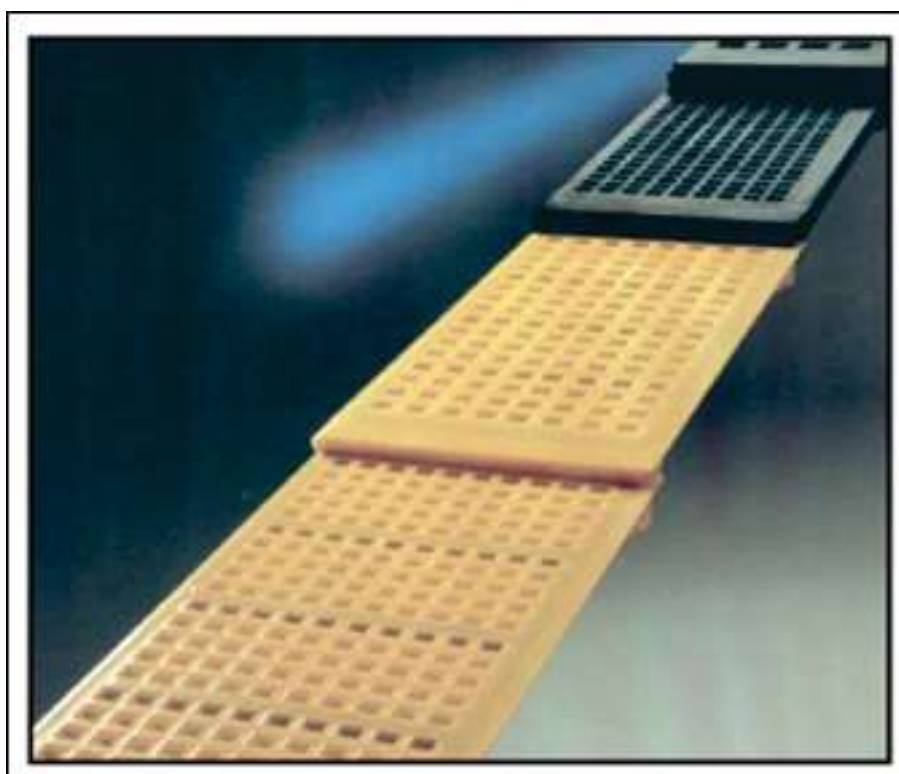
Telas de borracha estão progressivamente ganhando mais espaços em aplicações na mineração, pois estão disponíveis em uma variedade muito grande de tamanhos, porém elas têm uma área útil inferior às das malhas trançadas em uma mesma abertura e são mais suscep-

tíveis a ficarem total ou parcialmente obstruídas por causa do seu processo de fabricação (CHAVES e PERES, 2012).

Geralmente as telas de borracha são montadas em módulos ou painéis que são fixados em um sub-quadrado, ambos os materiais oferecem resistência excepcional à abrasão. A borracha também tem excelente resistência ao impacto; portanto, a borracha é frequentemente usada em aplicações onde o *topsize* pode ser maior do que 2" (50 mm) (WILLS, 2006).

Foram desenvolvidas para otimizar e reduzir custos do processo. Feitas em sistema modular para se adaptar aos diferentes tipos de peneiras, proporcionando três vantagens: maior precisão na separação; maior vida útil; maior produção. A Figura 25 ilustra módulos de borracha (METSO, 2005).

Figura 25: Tela de borracha.

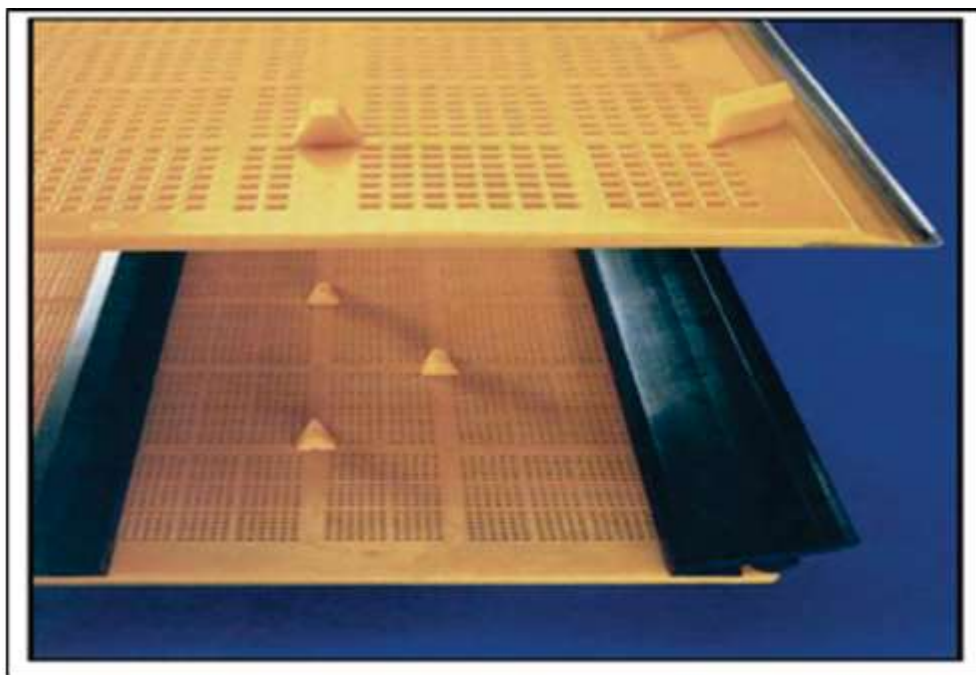


Fonte: Metso. (2010)

2.13.3. *Telas de poliuretano*

A maior vantagem do poliuretano modular, exemplificado na Figura 26, é a resistência excepcional de desgaste na maioria das aplicações; muitas vezes até 10 vezes a vida de desgaste é relatada sobre a tela de arame tradicional. Telas modulares não requerem tensão e re-tensão e se danificadas, seções da tela podem ser substituídas in situ. Telas de poliuretano e borracha também são mais silenciosas e as aberturas mais flexíveis reduzem a “cegueira” em comparação com as telas de arame de aço (WILLS, 2006).

Figura 26: Tela de poliuretano



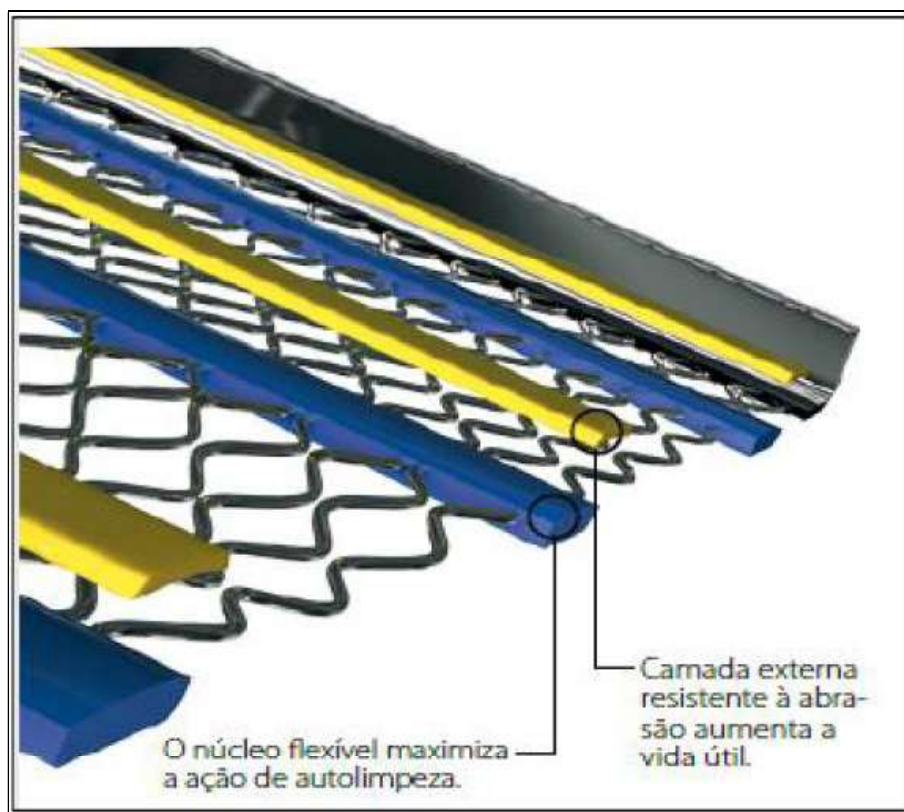
Fonte: Metso, (2010)

2.13.4. *Telas autolimpantes*

Segundo Nunes Filho (2017), as telas autolimpantes combinam as propriedades do poliuretano, com boa resistência ao desgaste e a maior área livre proporcionada pelo aço. Essas telas são assim dotadas de um núcleo interno flexível que aumenta a vibração dos filamen-

tos individuais. Essa vibração inibe o acúmulo de material na superfície da peneira, o que evita o entupimento e aumenta a eficiência do peneiramento. A Figura 27 apresenta uma ilustração de tela autolimpantes.

Figura 27: Tela autolimpantes



Fonte: Nunes Filho. (2017)

Além dos variados tipos de telas outro fator importante a ser levado em consideração no dimensionamento de uma peneira é a forma da abertura da tela.

Segundo Gupta e Yan (2006), placas feitas de aços de carbono simples ou liga, incluindo aço inoxidável são usadas para fazer telas perfuradas. Polímeros duros, como poliuretano, e borracha também são usados com sucesso razoável para esse tipo de abertura. A forma das aberturas é geralmente circulares, quadradas ou retangulares conforme Figura 28.

Figura 28: Tipos de aberturas de tela.

CHAPA: aberturas (direções de fluxo indicadas)						
Redonda Alternada	Hexagonal alternada	Quadrada Alinhada	Quadrada alternada	Fenda alternada nas pontas	Fenda lateralmente alternada	Fenda alinhada
MALHA: aberturas (direções de fluxo indicadas)						
Quadrada	Retangular		Malha tripla alongada			
Malha mais utilizada. Permite uma separação mais precisa em todas as malhas. Mais adequadas para partículas de forma regular.	Permite maior vazão de alimentação, em razão da maior % de área aberta, ou arame mais pesado para uma dada % de área aberta. Menor precisão, cegamento reduzido.		Máxima área aberta, menor precisão (que pode ser aumentada dispondo-se as fendas perpendicularmente ao fluxo). Cegamento mínimo, em razão do comprimento da fenda e da vibração do arame.			
MALHA: fixação dos arames						
Superfície plana	Dobra dupla	Dobra fechada		Dobra corrugada		
Fornecer um fluxo mais livre na superfície. Minimiza o cegamento e a quebra do material. Arames uniformes permitem uma separação precisa. Eficiência relativamente baixa, adequada para escalpe.	Mais comumente utilizada. Construção rígida. A superfície irregular quebra o material que está sendo peneirado e aumenta a vazão de undersize. Permite boa separação com pequenas aberturas, ou pequena % de área aberta.	Malha mais rígida para maior % de área aberta, especialmente em peneiras vibratórias. Adequada para operações de escalpe.		Aramos a cada três ou quatro dobras, de modo a fornecer uma malha rígida com maior % de área aberta. Não é adequada para serviços pesados.		

Fonte: Chaves e Peres. (2003)

2.13.5. Tipos de movimentos

De acordo com Trubbianelli (2021), as peneiras vibratórias são desenvolvidas normalmente para determinado uso e para isso são desenhadas com certas particularidades. Isso permite alguns ajustes, mas geralmente não uma mudança drástica de função.

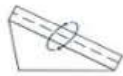
A vibração nas peneiras industriais ocorre mediante excitação causada por forças de origem centrífuga, gerada pela rotação de massas excêntricas, ou contrapesos.

Uma expressão muito comum para peneiras industriais é relativa à força de lançamento ou força G (FG), definida como o pico na aceleração da peneira (Nunes Filho, 2017).

O Movimento Livre Circular, que é um dos mais utilizados por sua simplicidade e facilidade de ajustes, chegando a ser considerado por alguns como o “fusca das peneiras”. O Movimento Circular Excêntrico, que tem uma diferença fundamental comparado ao Livre

Circular, apesar do tipo de movimento ser o mesmo, e que, portanto, tem possibilidade de regulação diferente, conforme Figura 29.

Figura 29: Tabela comparativa dos movimentos de vibração de peneiras

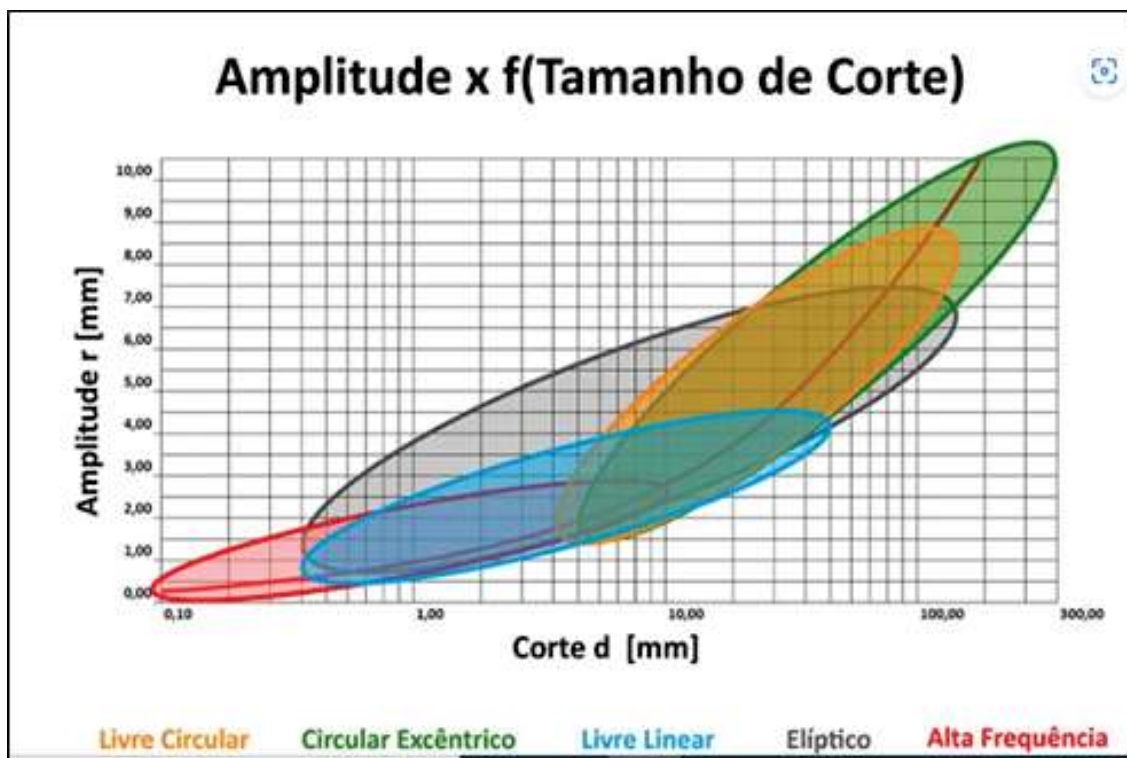
TABELA COMPARATIVA ALGUNS MOVIMENTOS DE VIBRAÇÃO PARA PENEIRAS					
Movimento	Forma do Movimento	Faixa de classificação mais utilizada	Amplitude	Frequência	Construção da Peneira
Livre Circular		4 a 150mm	Variável e Ajustável	Ajustável	Inclinada
Circular Excêntrico		5 a 300mm	Fixa	Ajustável	Inclinada
Livre Linear		0,4 a 50mm	Variável e Ajustável	Ajustável	Inclinada, Horizontal ou Active
Elíptico		0,4 a 150mm	Variável e Ajustável	Ajustável	Inclinada
Alta Frequência		0,04 a 10mm	Variável e Ajustável	Ajustável	Inclinação mais acentuada

Fonte: Revista Agregados on line. (2021)

Também existem os movimentos livre linear, elíptico e de alta frequência. Antes de apresentar o quadro comparativo Trubbianelli (2021), traz informações que facilitam o entendimento. A vibração ou oscilação é qualquer movimento que se repete, regular ou irregularmente dentro de um intervalo de tempo. Na engenharia esses movimentos se processam em elementos de máquinas e em estruturas quando submetidos a ações dinâmicas.

Ainda de acordo com Trubbianelli (2021), não se usa qualquer tipo de vibração, pois além de existirem diferentes tipos de movimento que geram essa vibração, conforme Figura 30, é necessário que ela seja adequada ao propósito e abertura da tela, portanto, dentro das condições dinâmicas ideais para se atingir a melhor eficiência possível de classificação.

Figura 30: Gráfico Amplitude x Tamanho do Corte



Fonte: Revista Agregados on line, (2021)

2.14. Dimensionamento de peneiras industriais

Segundo Nunes Filho (2017), a seleção de peneiras é uma tarefa muito difícil, pois existem uma diversidade de equipamentos disponíveis e uma grande variedade de parâmetros que necessitam ser avaliados. É bastante comum a afirmação de que “a escolha da peneira é mais uma arte do que uma ciência” (WEISS, 1985).

As peneiras são peças vitais e críticas em qualquer usina de beneficiamento. Dessa forma, todo cuidado deve ser tomado na seleção de peneiras para que sejam do tamanho e tipo adequado. Uma peneira ou grelha são definidas inicialmente pelas suas dimensões e pelo tipo de abertura (quadrada, retangular, circular, elíptica ou alongada). Deve-se lembrar que existe uma relação entre o tamanho máximo de partícula que pode passar numa determinada abertura e as dimensões do fragmento passante. Sendo assim, as dimensões máximas mencionadas anteriormente não são as reais, pois uma partícula de tamanho “a” pode não passar através de

uma abertura “a”. Assim, em uma operação de classificação e peneiramento, de malha ou abertura “a”, dizemos que só irão passar partículas “Ka”, sendo K um fator de redução, tal que:

- Se $0 < K < 0,5$, as partículas passam livremente;
- Se $0,5 < K < 0,85$, as partículas passam com dificuldade e
- Se $0,85 < K < 1,00$, o material praticamente não passa pela abertura (fração crítica de separação) (CARRISSO; CORREIA, 2004).

Segundo Correia e Couto 2012, os dados necessários para seleção e dimensionamento de equipamentos são:

a) características do material a ser peneirado, tais como:

- Densidade e umidade;
- Forma das partículas;
- Tamanho máximo da alimentação;
- Presença de materiais argilosos;
- Distribuição granulométrica;
- Temperatura, entre outros;

b) capacidade;

c) faixas de separação do produto;

d) eficiência desejada;

e) tipo de serviço – lavagem, classificação final, classificação intermediária etc.;

f) limitação ou não de espaço e peso;

g) grau de conhecimento do material e do produto desejado.

Existem vários métodos (equações para modelar) desenvolvidos pelos fabricantes e todos eles são conservadores. De qualquer forma, há duas considerações importantes e independentes a serem atendidas:

- 1 - Área necessária para a passagem do *undersize* deve ser provida;
- 2- Para haver estratificação satisfatória do leito é necessário assegurar que, na descarga, altura do leito seja no máximo quatro vezes a abertura da tela (na realidade esta altura máxima varia em função da densidade do minério). Como as duas condições têm de ser atendidas, um dimensionamento, que apenas calcule a área, sem provisão para descarga do *oversize*, corre sérios riscos de estar errado. Se o peneiramento for feito a úmido, a quantidade necessária de água é função principalmente da quantidade de lamas presentes na alimentação (CHAVES e PERES, 2012).

Segundo Correia e Couto 2012, no caso de dimensionamento das peneiras, duas condições independentes devem ser atendidas, sendo elas a área da tela e a espessura do leito.

Segundo Nunes Filho (2017), a boa prática da seleção de peneiras recomenda que a razão entre o comprimento e a largura seja de no mínimo 2:1. Sendo assim, uma peneira de 1.220 mm de largura, por exemplo, deverá ter no mínimo 2.440 mm de comprimento.

Na prática, nenhum peneiramento industrial é capaz de atingir eficiência absoluta, portanto se faz necessário que a dimensão do equipamento e todos os parâmetros estabelecidos sejam suficientes para se garantir a eficiência mínima desejada. A maioria dos modelos de dimensionamento de peneiras existentes e utilizados globalmente tem como ponto comum a determinação da “área de peneiramento”.

Segundo King (2001), a hipótese mais importante nesse tipo de abordagem é que a capacidade da peneira seja diretamente proporcional à sua superfície de peneiramento.

Para efeito nesse trabalho os métodos de dimensionamento da peneira foram os considerados mais tradicionais, qual seja, VSMA (Vibrating Screens Manufacturer Association). Esse método vem sendo aprimorado para torná-lo mais preciso. Na atualidade os métodos mais utilizados são o denominado Allis-Chalmers e o método de Peter King (MPK).

2.14.1. Método de Allis-Chalmers (MAC) 95

De acordo com Nunes Filho (2017), a fórmula para o cálculo da área (em m²) necessária da peneira para remover o material passante na alimentação pode ser, portanto, calculada a partir da seguinte expressão Equação 2:

$$A = \frac{T \times P}{C \times M \times K \times Q_n}$$

Eq. (2)

Sendo:

A: área necessária da superfície da peneira [m²];

T: alimentação do *deck* da peneira [m³/h], (Se a indicação é dada em t/h, dividir por densidade aparente do material);

P: fator de projeto que varia entre 1 e 1,4;

C: capacidade unitária do peneiramento [(m³/h) / m²];

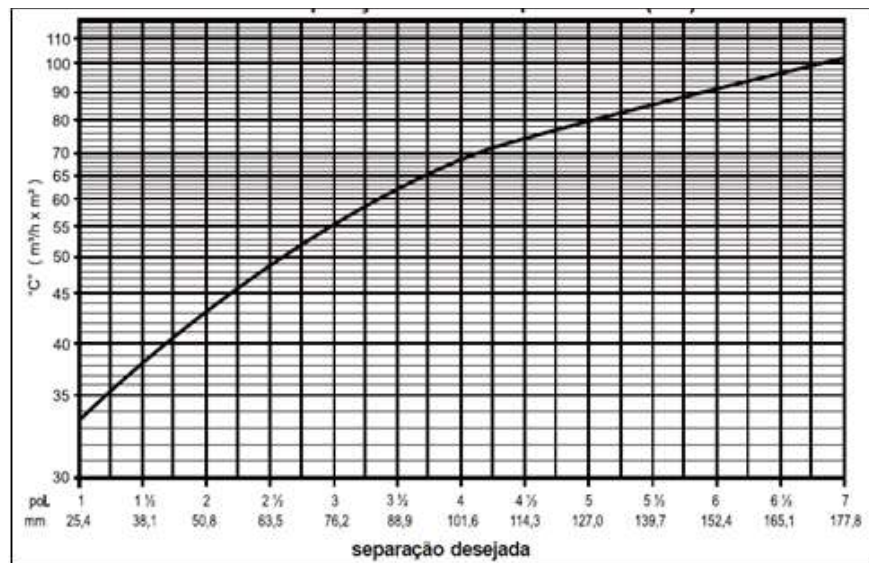
M: fator dependente da % de material retido;

K: Fator relativo a % de material da alimentação inferior à 1/2 do tamanho da operação;

Qn: fator de correção, Q1.....Q6;

O fator “C” é de natureza empírica sendo representado na Figura 31. A densidade aparente do material para o cálculo é de 1,6 t/m³ do material, para densidades diferentes uma adequação deve ser realizada.

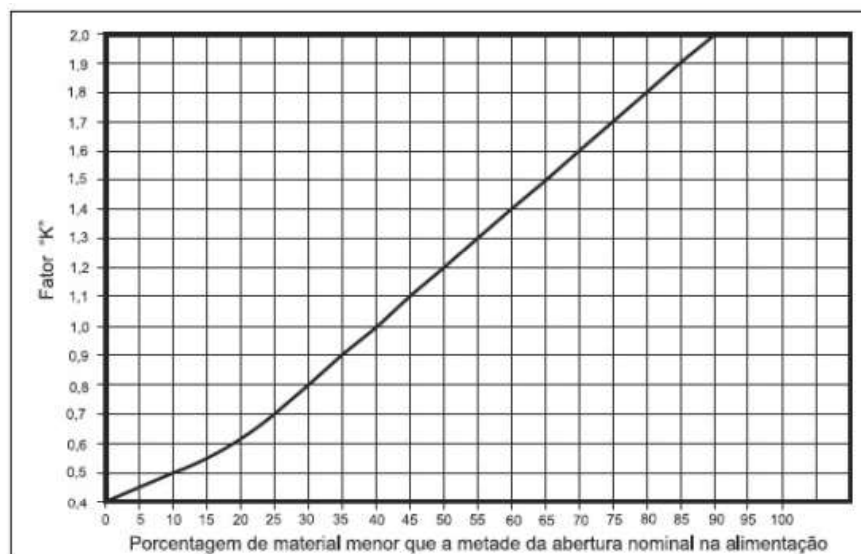
Figura 31: Fator de capacidade "C" para separações maiores que 25 mm



Fonte: Metso. (2005)

O fator "K" representa a porcentagem de finos na alimentação da peneira, menor que metade do tamanho da abertura da tela. Desta forma, segundo MAC, quanto maior a quantidade de finos, dentro desta faixa de tamanho, menor será a exigência de área de peneiramento. Vale notar, no entanto, que o método não considera os efeitos da maior área superficial associada ao aumento de finos no material, o que implicaria numa maior absorção de umidade e aderência destas partículas entre elas próprias e na abertura da tela, potencializando os riscos de cegamento, a Figura 32 apresenta a curva empregada na definição do fator K.

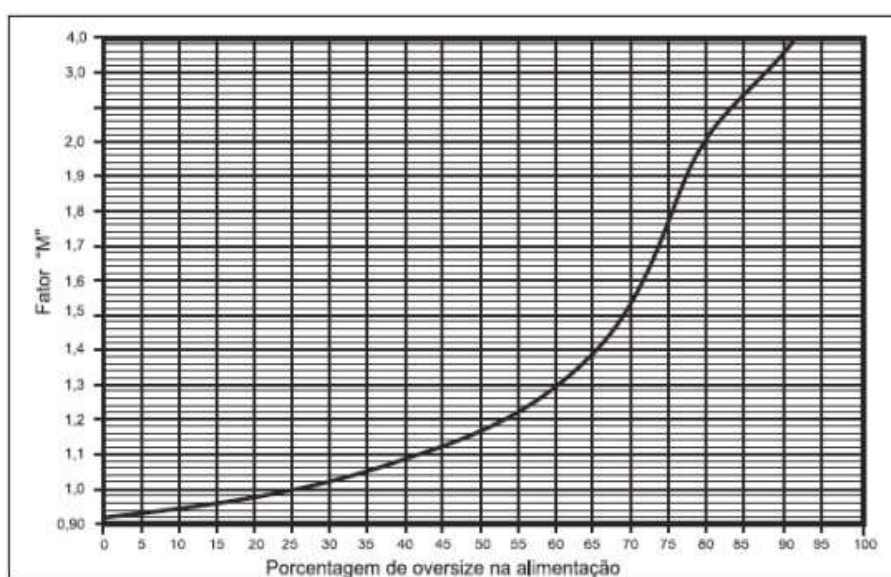
Figura 32: Fator devido à quantidade de *oversize* "K"



Fonte: Nunes Filho. (2017)

O fator “M”, pelo contrário, varia em função da porcentagem de grossos presentes na alimentação. A interpretação deste fator sugere que quanto maior a porcentagem de grossos, mais fácil se torna o peneiramento, representado consequentemente por uma peneira de área menor. A maior quantidade de partículas grossas pode significar também numa maior quantidade de interstícios na camada de minério, favorecendo o escoamento e estratificação de partículas finas. A Figura 33 apresenta a curva do fator “M” em função da porcentagem de grossos (*oversize*) na alimentação.

Figura 33: Fator devido à quantidade de *oversize* “M”



Fonte: Nunes Filho. (2017)

O fator de correção Q1 é relativo à posição do *deck* da peneira. Quando o cálculo é relativo ao primeiro *deck*, o fator assume simplesmente o valor 1. Para o segundo *deck*, o valor de 0,9, e para o terceiro *deck*, 0,8, e assim sucessivamente.

O fator Q2 é relativo à forma das partículas. Quando se predomina formas mais regulares (cúbicas ou esféricas), é considerado o valor 1. Para formatos irregulares (lamelares, alongadas), o fator assume o valor 0,9. Evidentemente, quanto mais irregulares são as partículas, maior a área de peneiramento.

O fator Q3 é utilizado no caso de peneiramento a úmido. A Tabela 2 apresenta os valores utilizados no método, e que estão diretamente relacionados ao tamanho de separação.

Tabela 2: Valores para Q_3 em função do tamanho de separação

Separação (mm)	1 - 6	6 - 12	12 - 25	26 - 40	41 - 50	51 - 75	+ 75
Q_3	1,4	1,3	1,25	1,2	1,1	1,15	1

Fonte: Adaptado de Metso Minerals. (2005)

O fator Q_4 varia conforme a umidade do material alimentado no caso de peneiramento a seco. Para valores de umidade menor que 3%, o valor utilizado é igual a 1. Materiais com umidade entre 3% e 5%, Q_4 assume o valor de 0,85. Acima de 5% e até 8%, adota-se o valor de 0,7. O método não é recomendado para materiais com umidade superior a 8%.

De acordo com Nunes Filho (2017), a definição acima para o valor de Q_4 era muito simples e não relacionava a umidade em relação a malha de peneiramento. No entanto, é sabido que quanto menor é a abertura da peneira maior será a influência da umidade no desempenho do peneiramento. Então recentemente foi desenvolvido pela Metso Minerals um ábaco para quantificar o fator Q_4 em função das aberturas de peneiramento e umidades, conforme a Figura 34.

Figura 34: Fator de umidade em função da abertura da peneira



Fonte: Nunes Filho. (2017)

O fator Q_5 está relacionado com o percentual da área aberta da superfície de peneiramento. A rigor, quanto maior a área aberta da tela, menor a dificuldade de peneiramento e menor a área da peneira. A Tabela 3 apresenta os valores normalmente utilizados para as correções.

Tabela 3: Valores para Q₅ em função da % de área aberta

% aberta	10	15	25	30	40	50	60	70
Q ₅	0,78	0,83	0,9	0,93	0,97	1	1,03	1,05

Fonte: Adaptado de METSO Minerals. (2005)

Segundo Nunes Filho (2017), nas aplicações mais convencionais, a regra é:

Telas de aço quadrada: Q₅ = 1 e retangular = 1,05;

Placa em aço perfurada quadrada: Q₅ = 0,75 e retangular = 0,8;

Telas em poliuretano/borracha quadrada: Q₅ = 0,8 e retangular = 0,9;

Borracha flexível: abertura quadrada: Q₅ = 0,9 e retangular = 1.

O fator Q₆ se refere à inclinação da peneira. No caso exclusivo de MAC, o fator também está relacionado ao tipo de movimento da peneira. Peneiras inclinadas convencionais com movimento circular adota-se Q₆ igual a 1.

De acordo com o material da Metso (2005), o valor de Q₆ para peneira banana assume valores de acordo com a Tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Fator Q₆ para peneira banana

% de material passante	70	60	50	40	30
Fator Q ₆	1,4	1,3	1,2	1,1	1

Fonte: Adaptado de Metso Minerals. (2005)

Segundo Nunes Filho (2017), existe uma vasta variedade de modelos de peneiras, e cada fabricante adota um valor para Q₆ diferente. Este fator é estimado de maneira empírica e por isso é tratado de forma confidencial por fabricantes. Por exemplo, para peneiras elípticas, devido ao seu tipo de movimento diferenciado, adota-se um valor de Q₆ específico. Porém o método de cálculo não leva em conta vários fatores que podem afetar de forma considerável a eficiência do peneiramento, tais como; efeito nas variações da aceleração; não tem precisão para classificação muito fina (> 1 mm) e não determina a influência da umidade nos peneiramentos difíceis (com umidade superior a 10%), entre outros.

2.14.2. Método de Peter King (MPK)

King (2001) apresenta um método matemático, baseado na literatura clássica da Allis Minerals System (ALLIS-CHALMERS, 1953), publicada pela Metso (2005), que possibilita o cálculo da área necessária do *deck* de peneiramento. Esta metodologia se baseia na medida da capacidade, em toneladas por hora, e na área unitária da superfície de peneiramento. Fatores de correção são considerados à medida que se varia algum parâmetro operacional, do equipamento ou do material, em relação à condição padrão.

De acordo com King (2001), a fórmula para o cálculo da área em (m²) necessária da peneira para remover o material passante na alimentação pode ser, portanto, calculada a partir da seguinte expressão na Equação 3:

$$A = \frac{W^F \times k_p}{W_u^F \times \prod k_i} \quad \text{Eq. (3)}$$

Diferentemente do método anterior, MPK considera a aplicação de praticamente todos os parâmetros e fatores na forma algébrica. Inicialmente a expressão da capacidade unitária, definida pela variável W_u^F , em toneladas por hora por metro quadrado é dada pela Equação 4.

$$\begin{aligned} W_u^F &= 0,783a + 37 \quad \text{se } a \geq 25\text{mm} \\ W_u^F &= 20,0a^{0,33} - 1,28 \quad \text{se } a < 25\text{mm} \end{aligned} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

a: abertura da tela da peneira [mm].

Nota-se que o tamanho de abertura de 25 mm separa uma tendência linear de crescimento, para valores acima deste tamanho, e um decréscimo mais acentuado, expresso por uma curva potencial, para valores menores que o valor de referência de 25 mm, similarmente ao MAC.

O fator de correção k_i também é utilizado para representar modificações em relação à situação padrão. Desta forma a capacidade unitária é multiplicada pelo produtório de k_i – $\prod k_i$ – onde i varia de 1 a 10. A capacidade unitária corrigida pode ser expressa, portanto, pela Equação 5.

$$W_{uF}^{F(corrig)} = WuF \times \prod k_i \quad \text{Eq. (5)}$$

O fator k_1 varia conforme ao percentual de finos presentes na alimentação. Isto é, percentual de finos menor que a metade da abertura predominante das telas instaladas na peneira. A Equação 6 exhibe esta relação.

$$k_1 = 2PF(0,5a) + 0,2 \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

PF(0,5a): percentual de finos menor que a metade da abertura da tela da peneira (%).

O fator k_2 representa o percentual de grossos (*oversize*) presente na alimentação da peneira, dado pela Equação 7.

$$k_2 = 0,914e^{(4,22\dot{P}^F(a)-3,50)} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

$\dot{P}^F(a)$: percentual de grossos (*oversize*) presente na alimentação da peneira.

As interpretações práticas dos fatores k_1 e k_2 são as mesmas discutidas para o MAC. O fator de posição do *deck* k_3 pode ser corrigido pela Equação 8.

$$k_3 = 1,1 - 0,1S \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

S: representa a posição do *deck*; 1 para o primeiro *deck*, 2 para o segundo *deck* e assim por diante.

O fator k_4 corrige a capacidade unitária quando a operação é a úmido. De acordo com a Equação 9 observa-se que a partir da abertura de 25 mm, ocorre perda de capacidade proporcional à diminuição da abertura.

$$k_4 = 1,0 + 2,4 \times 10^{-4} (25 - a)^{2,5} \quad \text{se } a \leq 25\text{mm}$$

$$k_4 = 1,0 \quad \text{se } a > 25\text{mm}$$
Eq. (9)

O fator de correção k_5 está relacionado com o percentual da área aberta da superfície de peneiramento (f_o). Como observado na Equação 10, o valor padrão de área aberta é igual a 50%, portanto, qualquer área aberta diferente dessa o fator assumirá valores diferentes de 1.

$$k_5 = \frac{f_o}{50}$$
Eq.10)

Outra particularidade a ser considerada tem relação com a densidade do material. Para materiais com densidade aparente menor do que 800 kg/m³ a área aberta padrão a considerar é de 60% ao invés de 50% para outras densidades. A equação, portanto, deve ser modificada proporcionalmente.

O fator k_6 está associado à forma das partículas. Partículas lamelares e alongadas têm maior dificuldade de atravessar as telas da peneira do que partículas mais regulares. Portanto, se a alimentação chegar a aproximadamente 15% de partículas irregulares k_6 deve ser ajustado em 0,9. Quantidades maiores deste tipo de partícula podem trazer problemas mais significativos e devem ser investigadas especialmente.

O fator de umidade k_7 representa a condição das partículas em relação à sua umidade natural. A Tabela 5 apresenta estas condições e valores dos fatores associados.

Tabela 5: Fator de umidade K_7

Condição da alimentação	k_7
Material muito úmido, argiloso ou pegajoso	0,75
Material com superfície úmida e materiais empilhados com umidade de até 15% (v/v)	0,85
Material britado seco	1
Material secado artificial ou naturalmente	1,25

O fator k_8 expressa a correção em decorrência do formato predominante da abertura da tela. A Tabela 6 apresenta estes valores.

Tabela 6: Fator abertura da tela k_8

Formato da abertura da tela	k_8
Circular	0,8
Quadrado	1
Retangular (2 x 1)	1,15
Retangular (3 x 1)	1,2
Retangular (4 x 1)	1,25

O fator k_9 tem a função de corrigir a capacidade da peneira em função da inclinação θ da peneira no sentido do escoamento, de acordo com a Equação 11.

$$k_9 = 1,0 - 0,01 (\theta - 15) \quad \text{Eq. (11)}$$

O fator k_{10} tem a função de corrigir as variações de densidade aparente da alimentação. A densidade padrão é igual a 1.600 kg/m³. Quanto menor a densidade, maior o volume ou vazão volumétrica ocupada pelo material sobre o *deck* da peneira, consequentemente maior a dificuldade do peneiramento. Esta situação é expressa pela Equação 12.

$$k_{10} = \frac{\rho_B}{1.600} \quad \text{Eq. (12)}$$

Onde:

ρ_B : densidade aparente do material da alimentação.

2.15. Determinação da largura da peneira

De acordo com Sales (2020), e de posse da definição da área da peneira, o próximo passo a se definir é seu comprimento e largura. Todos os métodos determinam a largura da peneira considerando a altura limite da camada de material na descarga da peneira. Conforme recomenda a maioria dos fabricantes de peneiras, a altura de camada de material na descarga deve ser no máximo quatro vezes o tamanho da abertura da tela. A Equação 13 apresenta o cálculo da altura desta camada, em função, principalmente da largura da peneira.

$$t_B = \frac{W_o}{Du\rho_B} \quad \text{Eq. (13)}$$

Onde:

W_o : vazão mássica na descarga da peneira (*oversize*) [t/h];

D : largura da peneira [m];

u : velocidade de transporte das partículas sobre a superfície de peneiramento [m/h];

ρ_B : densidade aparente [t/m³].

Com base na experiência prática de usuários e fabricantes, é recomendado que a razão comprimento versus largura seja de, no mínimo, 2:1 (NUNES FILHO, 2017).

2.16. Eficiência do peneiramento

A eficiência de peneiramento é determinada pelo “grau de perfeição” de separação do material em relação à fração granulométrica acima ou abaixo do tamanho da abertura (WILLS, 2006).

Segundo Luz et al, (2010), industrialmente, a eficiência de peneiramento situa-se entre 80% a 90%, atingindo-se em alguns casos 95% (calculada neste caso conforme Equação 3.21). No entanto, vale ressaltar, que valores de eficiência podem variar drasticamente em função das interferências de uma ou mais variáveis descritas no tópico anterior: tamanho de partícula, taxa de alimentação, ângulo da peneira, forma da partícula, área aberta, condição dinâmica da peneira, umidade, dentre outras.

Toda peneira deveria idealmente deixar passar todo fino presente na alimentação (material menor do que a abertura da tela) para o fluxo de *undersize*. No entanto, não é isto que se observa na prática. Por isto a necessidade de se avaliar a eficiência de peneiramento ou de transmissão, conforme denominado por King (2001). Portanto, para se encontrar a eficiência de peneiramento, segundo King (2001), deve-se calcular inicialmente a relação de classificação RR, conforme Equação 14.

$$RR = \frac{W^F}{W_u^F (corrig) \times A} \quad \text{Eq. (14)}$$

A eficiência de peneiramento (transmissão) E pode ser expressa pelas Equações 3.52 e 3.53.

$$\begin{aligned} E &= 0,95 - 0,25(RR - 0,8) - 0,05(RR - 0,8)^2 & \text{se } RR \geq 0,8 \\ E &= 0,95 - 1,67(0,8 - RR)^2 & \text{se } RR < 0,8 \end{aligned} \quad \text{Eq. (15)}$$

2.17. Análise granulométrica

Segundo Valadão et al (2012), a análise granulométrica é um estágio “básico e obrigatório” de qualquer estudo de caracterização mineral. Consiste no peneiramento de mas-

sa conhecida, através de uma série de peneiras instaladas segundo certo padrão. As massas retidas em cada peneira são pesadas e seus valores registrados em tabela junto às malhas de peneiramento. O resultado pode ser expresso através de curvas de distribuição granulométrica, que será detalhada adiante.

Dentre as finalidades e importância da análise granulométrica, pode-se citar algumas aplicações:

- 1- Controle de produção de finos nos processos de cominuição;
- 2- Etapa preliminar para estabelecimento do grau de liberação em intervalos de tamanhos bem definidos;
- 3- Controle de especificações de mercado;
- 4- Distribuição de elementos (química e mineralogia) por faixa granulométrica;
- 5- Avaliação da eficiência (desempenho) de equipamentos ou processos de separação por tamanho, ou de outras operações unitárias de beneficiamento.

Os métodos de análise de tamanho de partículas devem ser exatos e confiáveis, uma vez que alterações significativas nos resultados de plantas de beneficiamento são investigadas a partir de procedimentos de laboratório, conforme descreve (WILLS, 2006).

O resultado de uma análise granulométrica geralmente é expresso a partir do percentual passante ou percentual retido acumulado. São utilizadas tabelas, que apresentam a distribuição granulométrica de uma amostra típica de minério (SALES et al, 2011).

Segundo King (2001), funções de distribuição, de maneira geral, podem definir quantitativamente a maneira com que valores desta propriedade se distribuem em torno de uma população de partícula. Uma das funções mais aceitas e utilizadas é a função de distribuição de tamanho de partículas $P(d)$ definida como a fração da população cujas partículas sejam de tamanho menor ou igual ao tamanho d , sendo que o símbolo d representa o tamanho de uma partícula.

2.18. Índice de forma

A forma das partículas tem influência direta em diversas operações de tratamento de minérios, principalmente as operações de peneiramento, nas quais o objetivo é a separação a partir do tamanho das partículas.

De acordo com Dana (1974), as partículas minerais são agrupadas dentro das seguintes classes: acicular, angular, cristalina, dentrítica, etc. O que pode auxiliar na identificação de determinados minerais. Entretanto, para Gotoh e Finney (1975), para uma análise quantitativa estes termos são considerados inadequados. Segundo esses autores, a dificuldade em realizar a análise da forma das partículas consiste no fato de que tamanho e forma serem matemática e logicamente inseparáveis. A Figura 35 nos mostra que na medição do tamanho da partícula utilizando o diâmetro equivalente da esfera, pode-se usar os diâmetros equivalentes baseados em diferentes dimensões, tais como o diâmetro de esfera com mesmo volume, área superficial ou mesmo a área projetada da partícula irregular a ser medida.

Figura 35: Diâmetros equivalentes para uma mesma partícula



Fonte: Poole et al. (1998)

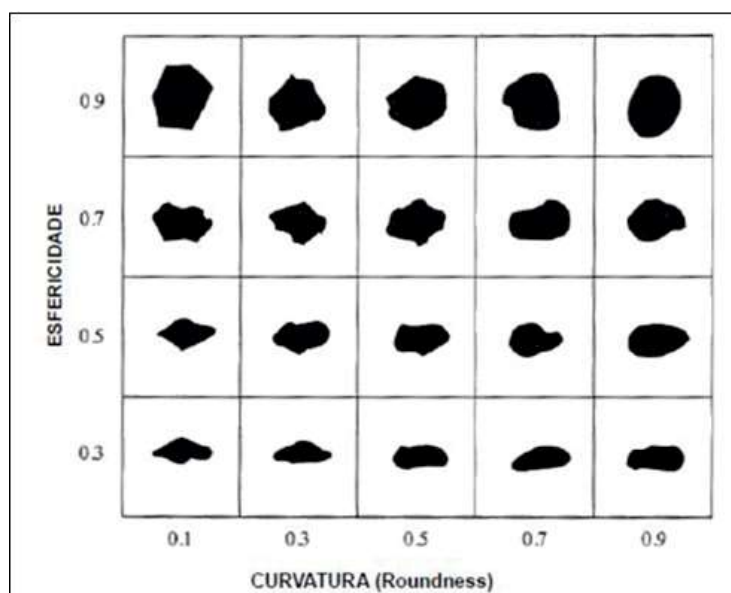
Segundo Allen (1997), a forma das partículas influencia muitas propriedades tais como: fluidez, empacotamento, interação com fluidos, porosidade, comportamento da torta e poder de cobertura de pigmentos. A maior dificuldade em se caracterizar a forma das partículas deve-se ao fato de a natureza das partículas minerais não apresentarem formas bem defini-

das e fáceis de determinar. Além do mais é impossível se descrever qualquer partícula mineral dentro da noção que se tem das formas geométricas básicas conhecidas.

Quanto maior for a irregularidade da partícula mais divergentes serão os valores dos diâmetros adotados. Foram então criadas várias relações numéricas, com a finalidade de se realizar uma medição quantitativa das características das partículas. Segundo Allen (1997), a quantificação das partículas pode ser feita de forma macroscópica, através de coeficientes de forma (relação entre tamanhos medidos e o volume ou a superfície da partícula) e de forma microscópica, através de fractais ou por transformada de Fourier. Poole e Sims (1998) descrevem a forma de partículas de agregado a partir do uso de dois parâmetros: “esfericidade” e “curvatura”.

Assim sendo a esfericidade pode ser definida como a relação entre o diâmetro equivalente da partícula e sua máxima dimensão, enquanto a curvatura é a relação entre o raio médio dos cantos e limites pelo raio de circunferência máxima. As Figuras 36 e 37 apresentam exemplos da classificação destes dois parâmetros.

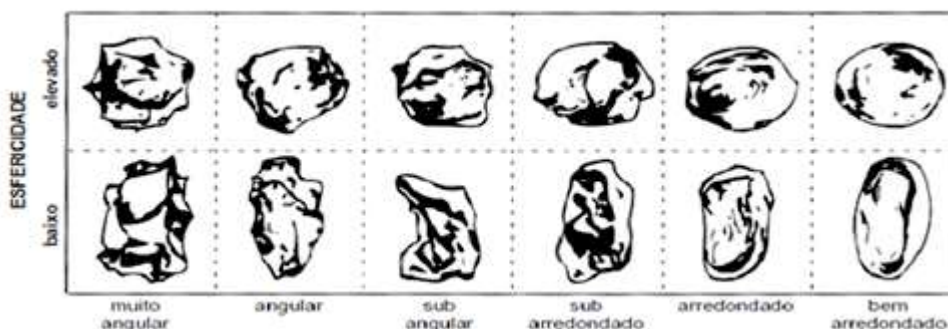
Figura 36: Forma de partícula. Grau de esfericidade x curvatura



Fonte: Poole et al. (1998)

Uma versão simplificada desta classificação é considerar as partículas de baixa esfericidade diferenciadas em “partículas lamelares ou achatadas” (relação entre espessura pelas outras dimensões, menor do que dado valor) e “partículas alongadas ou aciculadas” (relação entre comprimento e outras dimensões, superior a dado valor).

Figura 37: Forma de partícula. Grau de esfericidade



Fonte: Cremasco. (2012)

O índice de forma, segundo Poole et al., (1998) pode ser definido pela relação entre comprimento (maior lado) e largura (menor lado). Deste modo, uma partícula “não-cúbica” pode ser considerada aquela cuja razão entre o seu comprimento e largura seja superior a 3. O índice corresponde ao quociente da massa das partículas não-cúbicas pela massa da amostra.

2.19. Tecnologias para o peneiramento a seco

Existem no Brasil empresas altamente comprometidas com o processo de peneiramento e pioneiras nesse assunto. A Metso Outotec e a Latex do Brasil são empresas responsáveis por testes e produtos voltados para esse fim.

De acordo com Ogawa (2021), a Metso Outotec começou a fazer uma série de testes de laboratório desde 2008, que eventualmente resultou no desenvolvimento de uma tela de movimento elíptico com alta força G. A tecnologia tem funcionado com alta disponibilidade, confiabilidade e desempenho no site do cliente por muitos anos e foi otimizada com a ajuda de valiosos comentários do cliente.

A operação 5-6G combinada com o movimento elíptico e as telas de borracha de alta resiliência reduzem o cegamento e o “pegamento” do minério de alta umidade, permitindo maior capacidade em comparação com o movimento linear ou circular. Com essa tecnologia, é possível utilizar os mesmos tamanhos das telas convencionais.

As telas podem entupir durante a operação de peneiramento de agregados e minérios, assim a produção pode cair abaixo do planejado. Esse problema acontece por dois motivos: pode acontecer no processamento de materiais com alto teor de umidade ou na escolha inadequada do tipo de tela utilizada.

De acordo com Duarte (2022), coordenador técnico da Lantex do Brasil, constata-se que vários fatores provocam entupimento de telas, como o grande número de partículas da chamada classe crítica. “Isso significa que as partículas compreendidas na faixa granulométrica com diâmetro superior a metade da malha (0,5a) até uma vez e meia a abertura da mesma (1,5a), necessitam de uma quantidade grande de tentativas para passar pelas telas ou as obstruem por diversas vezes, até saírem do processo como material retido”, explica.

Outras situações também contribuem, segundo ele, para esse problema, como o peneiramento de material fino, devido à elevada quantidade de área superficial específica. O uso de telas metálicas com fios muito espessos em relação à abertura da malha e a aplicação de telas de borracha ou poliuretano com design de malha sem ângulo de saída para passagem das partículas também costumam causar entupimento, assim como fatores onde o material peneirado possui eletricidade estática.

Duarte (2022) recomenda a realização de inspeções visuais durante o processo, para verificar se as telas metálicas estão bem tensionadas e não colidem contra o quadro do equipamento em operação. “Essa averiguação é importante também, para observar se o arqueamento está adequado, se a superfície de peneiramento possui nivelamento correto e inclinação adequada, além de ajustes de amplitude e frequência dos equipamentos”, explica.

Outra variável que influencia na performance do peneiramento é a condição meteorológica, pois o produto peneirado pode se comportar de forma diferente quando submetido à umidade provocada pelas chuvas em determinados períodos no ano. Nesse caso, é necessário utilizar telas autolimpantes, para melhorar a eficiência.

Algumas vezes, ocorre em uma mesma jazida frentes de lavra com materiais de características diferentes, o que influencia no peneiramento. Essa situação pode ser facilmente identificada por uma equipe atenta e bem treinada.

Alguns métodos paliativos, como bater nas telas com marretas ou algo para desaglomerar as partículas das malhas e umas das outras, ou mesmo lavar as telas entupidas com água pressurizada, podem ser soluções momentâneas, mas resultam em perda de produtividade porque exigem parada de equipamento ou aumentam os custos de manutenção e mão-de-obra.

2.20. Como evitar o entupimento

A manutenção simples e rotineira do equipamento e o aproveitamento das soluções de telas disponíveis atualmente são procedimentos adequados para evitar o entupimento, garantindo um nível alto de produção de material dentro das especificações. “A instalação de telas autolimpantes, como a Venomax, tensionadas ou modulares, módulos de tela de borracha de alta resiliência, são as maneiras mais fáceis de eliminar os problemas de obstrução de malhas”, explica Duarte (2022).

No caso das telas Venomax, sua característica construtiva permite o movimento relativo dos fios. Processo semelhante ocorre com as telas de borracha de alta resiliência, que devido ao tipo de material especial utilizado em sua fabricação, possibilita que a malha submetida a um tensionamento provocado pelo peso do material, recupere seu formato e características rapidamente, criando um efeito autolimpantes na tela (DUARTE, 2022).

Ambas as soluções maximizam a ação de peneiramento, para que o material de tamanho adequado passe ao invés de obstruir as telas. Em alguns casos o aumento de produção é tão significativo, que pode ser observado no volume de material que está sobre os transportadores de correia, Duarte (2022).

A grande maioria das telas utilizadas atualmente ainda é metálica, de malhas quadradas, devido ao custo-benefício propiciado por esses modelos. Porém, quando esses produtos não atingem a expectativa, há diferentes soluções que podem ser apresentadas a partir da análise da operação do cliente e diagnóstico do problema, (DUARTE, 2022).

2.21. Exemplo 01

Influência da umidade no dimensionamento e seleção de peneiras vibratórias em instalação de britagem – Tese de Mestrado – USP – Edis Siqueira Nunes Filho – 2017.

O trabalho apresentado por Nunes Filho (2017) teve como objetivo desenvolver um método físico de dimensionamento de peneiras de caráter inédito, que permitisse quantificar a capacidade específica de peneiramento ou peneirabilidade medida em $t/h/m^2$, para diferentes tipos de minérios em decorrência da variação no conteúdo de umidade e no tamanho da abertura empregada no ensaio.

Os sete minérios selecionados para a realização dos ensaios, com massa de 50 kg (base seca) cada, foram subdivididos em três grupos, sendo o primeiro formado por minérios de ferro considerados típicos, o segundo por minérios de ferro considerados atípicos e o terceiro por uma amostra de bauxita.

Devido à grande dificuldade de selecionar peneiras vibratórias para aplicações difíceis, foi desenvolvido no centro de tecnologias da Metso um projeto de peneira especial em formato de círculo, chamado Peneira Circular Infinita (PCI), conforme Figura 38.

Figura 38: Peneira Circular Infinita



Fonte: Nunes Filho. (2017)

Os dados da PCI são: raio interno de 600 mm, movimento linear, amplitude ajustável entre 3 mm e 6 mm, aceleração ajustável, geralmente de 4G até 7G e possibilidade de aplicar diferentes tipos de telas.

2.21.1. Caso A (Abertura de 16 mm)

Amostra composta predominantemente de hematita friável, com a distribuição granulométrica representada na Tabela 7. O tipo de tela da peneira foi o aço.

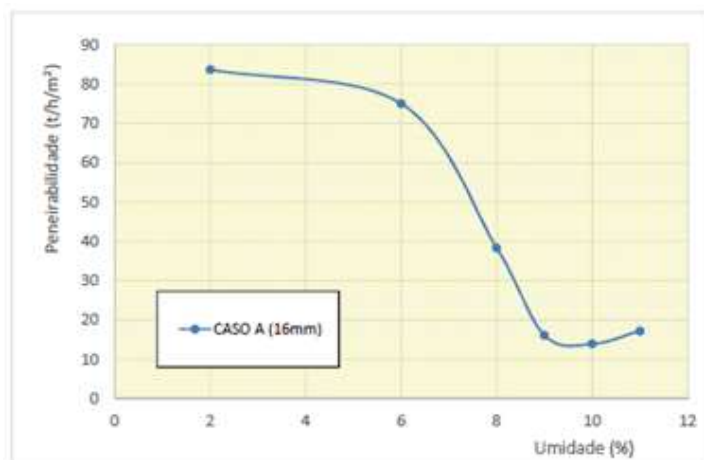
Tabela 7: Distribuição granulométrica

Tamanho (mm)	% Passante
50	100
31	96
25	95
19	93
13	88
4,75	78
1,19	49

Fonte: Nunes Filho. (2017)

O gráfico da Figura 39 apresenta que a peneirabilidade para o minério de ferro (caso A) é reduzida conforme a umidade aumenta. Em outras palavras, a peneirabilidade em tela de 16 mm pode ser extremamente fácil para umidades menores que 6%, de fácil a média até 8%, e impraticável na faixa de 9% a 11%, porém na faixa de 10% de umidade a umidade crítica foi alcançada.

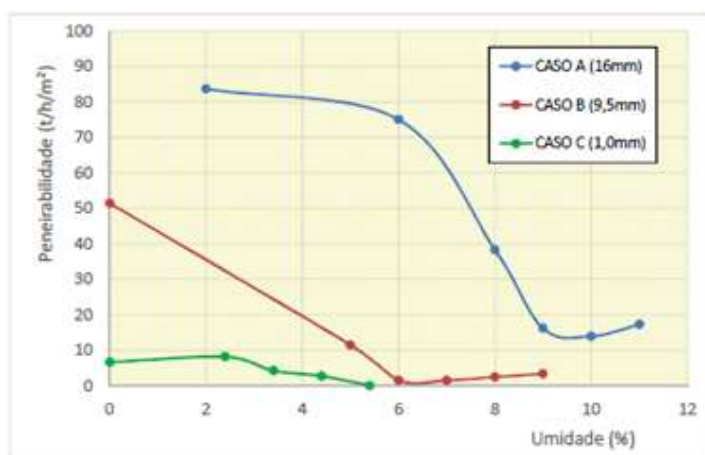
Figura 39: Capacidade específica versus umidade para tela de 16 mm



Fonte: Nunes Filho. (2017)

A seguir na Figura 40 há um quadro comparativo de três resultados. Essas curvas são características de peneiramento de minérios de ferro brasileiros compostos, predominantemente, de itabiritos e hematitas e evidenciam a grande influência, tanto da umidade quanto do tamanho da abertura, na peneirabilidade das amostras.

Figura 40: Capacidade específica dos casos A, B e C.



Fonte: Nunes Filho. (2017)

Os ensaios do subgrupo formado por minérios de ferro típico mostraram uma aderência razoável entre os pontos calculados e os experimentais. Os resultados confirmaram as observações de vários autores, de que a peneirabilidade reduz-se significativamente mediante o aumento da umidade e que, quanto menor a abertura do peneiramento, menores os valores de peneirabilidade alcançados e vice-versa.

Os ensaios do subgrupo formado por minério de ferro atípicos mostraram que os resultados foram significativamente diferentes entre os calculados e os experimentos. Assim, conclui-se que o método da Allis-Chalmers para selecionar peneiras industriais não deve ser aplicado em casos de minérios de ferro atípicos. A seleção deve-se basear em algum método físico.

2.21.2. Caso D (Abertura de 25 mm)

Amostra composta por goethita e alguns outros óxidos de ferro hidratados, minerais que se destaca por conter determinadas propriedades aderentes, segue a Tabela 8 com a distribuição granulométrica. O tipo de tela foi o aço.

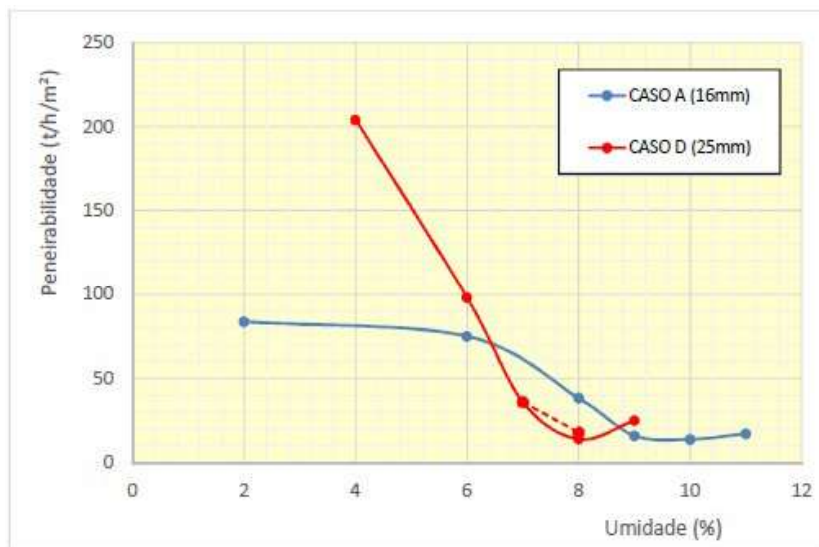
Tabela 8: Distribuição granulométrica

Tamanho (mm)	% passante
38	100
25	91
19	85
12,5	73
9,5	65
4,75	48
1,19	32

Fonte: Nunes Filho. (2017)

O caso D apresenta um gradiente de redução de peneirabilidade bem mais acentuado. A interpretação é de que, mesmo contendo pouca umidade, a goethita já começou a exercer força de aderência entre as partículas, prejudicando o desempenho do peneiramento em umidades baixas conforme a Figura 41.

Figura 41: Capacidade específica dos casos A e D



Fonte: Nunes Filho. (2017)

Após atingir a umidade crítica com 8%, foram realizados dois ensaios, no primeiro mantendo-se a umidade em 8%, porém aumentando a aceleração da peneira de 4,5 G para 5,5 G. O segundo e último ensaio foi realizado adicionando mais 1% de água, até atingir 9% de umidade, com aceleração de 4,5 G. Esses dois últimos ensaios resultaram em peneirabilidade superior, confirmando assim que a umidade crítica havia sido superada.

2.21.3. Ensaio com Bauxita, casos F e G

Os resultados de peneirabilidade obtidos nos ensaios do subgrupo formado por bauxita foram os que apresentaram os maiores desvios em relação aos calculados, os valores de umidade encontrados foram muito superiores a previsão feita pelo método Allis-Chalmers, segue a Tabela 9 com a distribuição granulométrica.

Tabela 9:Distribuição granulométrica

Tamanho (mm)	% passante
19	100
12,5	98,9
9,5	96,9
4,8	80,7
2,4	57,6
1,2	38,0

Fonte: Nunes Filho. (2017)

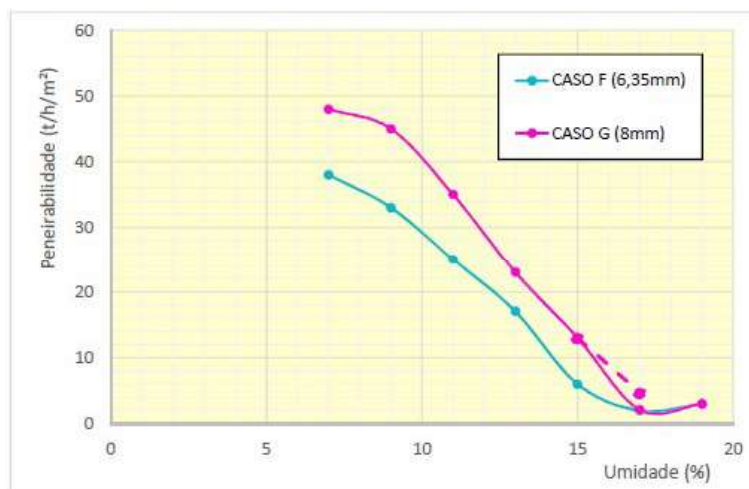
Os casos F e G apresentam a bauxita que ao contrário do minério de ferro, apresenta densidade mais baixa e, muitas vezes, é bastante pegajosa.

Os resultados mostram que, mesmo com telas de aberturas relativamente pequenas, a peneirabilidade foi fácil para umidades de até 11%, em ambos os casos. Esse resultado é bastante diferente quando comparado aos resultados obtidos nos ensaios com minérios de ferro típicos, em que a umidade crítica foi atingida antes de 11%.

Para a bauxita foi possível um peneiramento com até 15% de umidade, sendo que a faixa de umidade crítica foi atingida apenas em 16%-17%, conforme ilustrado na Figura 42.

Os resultados também mostram que a peneirabilidade foi gradualmente reduzida com o aumento da umidade para ambas as aberturas. A peneirabilidade foi sempre levemente superior para a tela de maior abertura para todos os ensaios.

Figura 42: Capacidade específica para os casos F e G

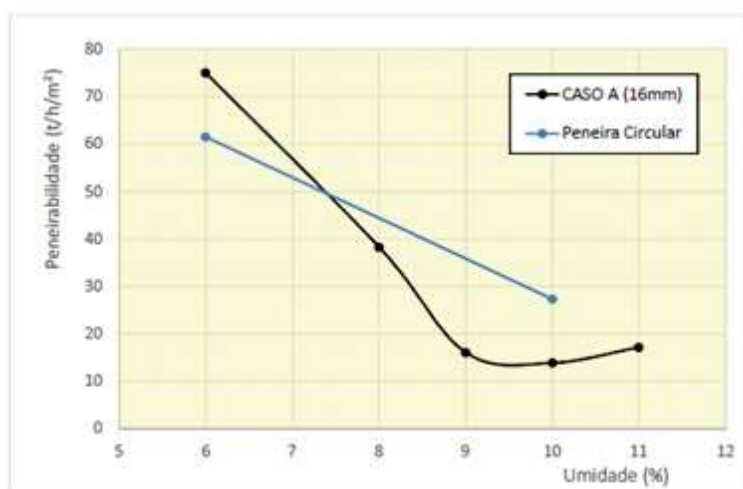


Fonte: Nunes Filho. (2017)

2.21.4. Comparação da PCI contra Peneira Circular no caso A.

A comparação apresentada na Figura 43 foi realizada utilizando os dados de peneirabilidade obtidos no caso A contra os dados obtidos através da inspeção em peneira industrial. A inspeção foi conduzida em uma peneira vibratória inclinada a 20° com movimento circular, largura de 8" (2,4 m) e comprimento de 20" (6,1 m), resultando em uma área de 14,6 m².

Figura 43: Peneirabilidade Caso A versus peneira circular



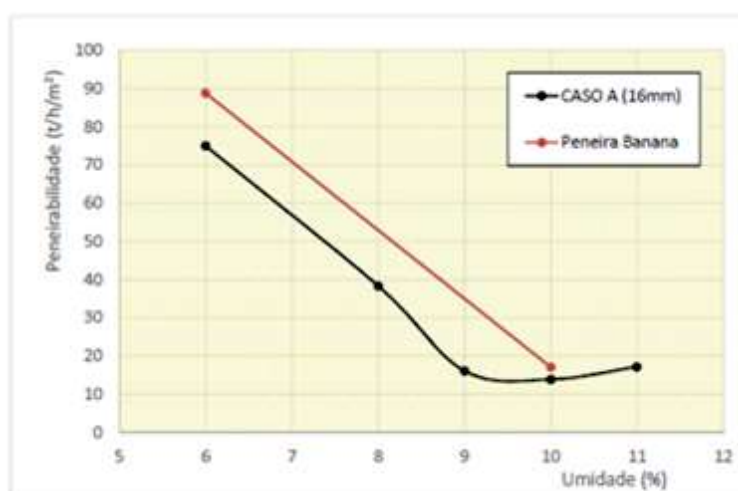
Fonte: Nunes Filho. (2017)

No período climático seco, a capacidade da peneira circular foi um pouco inferior aos resultados de peneirabilidade obtidos no laboratório. Já no período chuvoso as curvas se invertem, neste caso, o movimento circular passou a ser vantajoso, pois as partículas recebem impulsos em várias direções e diminuem a probabilidade de aderência às telas.

2.21.5. Comparação da PCI contra Peneira Circular no caso A.

A comparação apresentada na Figura 44 foi realizada utilizando os dados de peneirabilidade obtidos no caso A contra os dados obtidos através da inspeção em peneira industrial. A inspeção foi conduzida em uma peneira banana com mesma largura e mesmo comprimento em pés (8"x20 ") da peneira circular, resultando em mesma área de peneiramento.

Figura 44: Caso A versus peneira banana



Fonte: Nunes Filho. (2017)

Embora os resultados tenham sido melhores em condições secas, no período chuvoso foi observado que o desempenho da peneira banana foi bastante impactado. O movimento linear na peneira banana não se mostrou eficaz em atenuar o efeito da aderência em comparação ao movimento circular no período chuvoso.

2.21.6. Comparação entre o método proposto e o método Allis-Chalmers para dimensionamento de peneiras

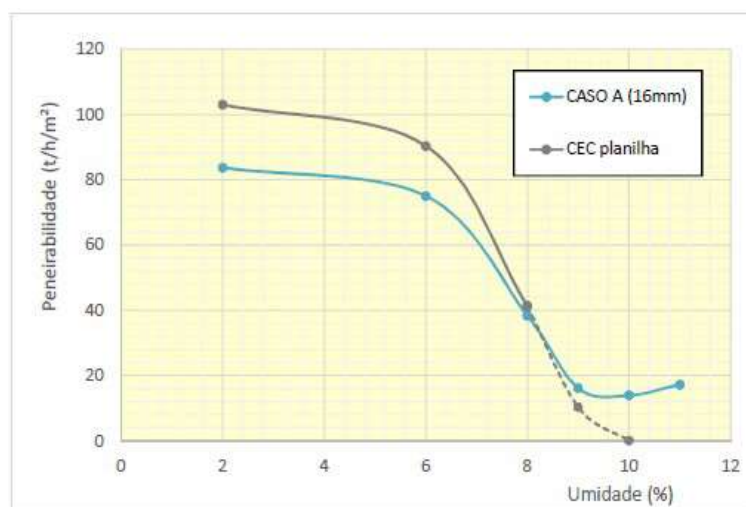
Os resultados dos ensaios conduzidos na PCI instalada nos laboratórios da Metso mostraram quão diferentes pode ser os desempenhos de um peneiramento à umidade natural, dependendo das características do minério ensaiado, da abertura de peneiramento e dos parâmetros do equipamento.

Assim, os sete resultados de peneirabilidade obtidos nos ensaios da PCI, sendo cinco para minério de ferro e dois para bauxita foram comparados diretamente à peneirabilidade calculada através do método Allis-Chalmers.

2.21.7. Comparativo Caso A

A Figura 45 apresenta os resultados da capacidade específica corrigida de peneiramento (CEC) e os obtidos pelo cálculo da Allis-Chalmers. Pode-se observar que o valor obtido no ensaio foi razoavelmente próximo ao resultado calculado na planilha, indicando que, para o minério analisado sob as umidades praticadas, a estimativa pode ser considerada satisfatória.

Figura 45: Capacidades específicas Caso A contra CEC Allis-Chalmers

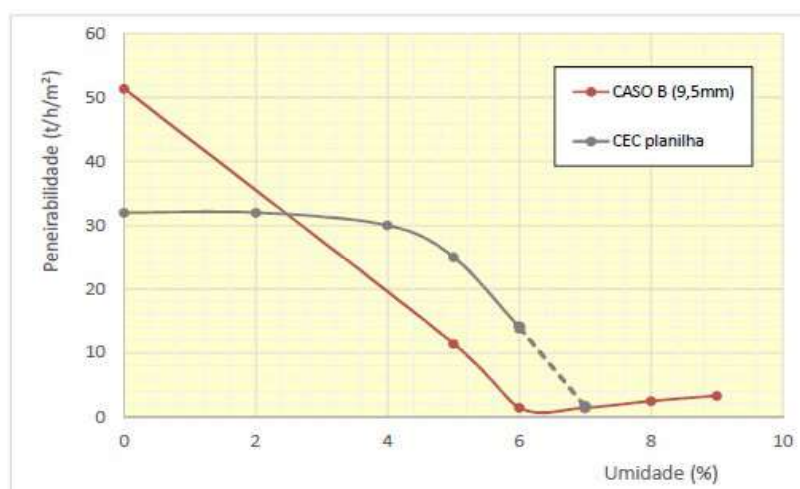


Fonte: Nunes Filho. (2017)

2.21.8. Comparativo Caso B

A Figura 46 apresenta as curvas comparativas entre os resultados de peneirabilidade obtidos na PCI do Caso B versus os resultados pelo método da Allis-Chalmers. A umidade crítica no ensaio foi alcançada em 6%, enquanto a tendência da curva construída pelo método Allis-Chalmers apontou para 7%. Nota-se no mesmo gráfico que as curvas pivotam em umidades entre 2% e 3%. Na prática isso pode gerar incertezas na seleção da peneira industrial pelo usuário.

Figura 46: Capacidades específicas para o Caso B contra CEC Allis-Chalmers

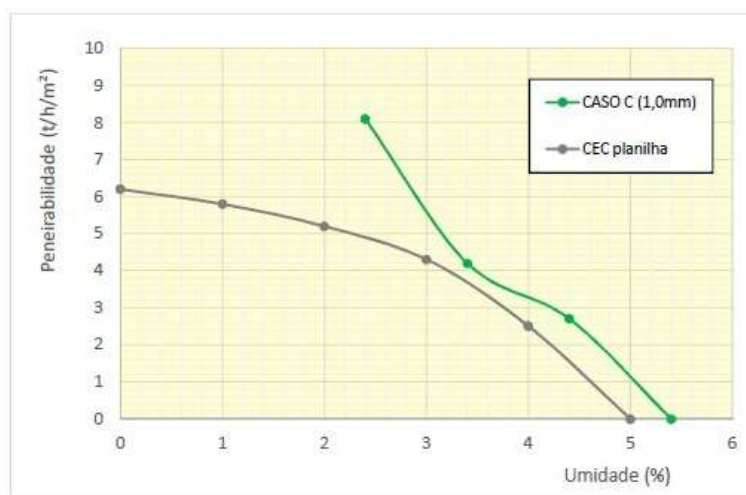


Fonte: Nunes Filho. (2017)

2.21.9. Comparativo Caso C

De forma geral o gráfico da Figura 47, apresenta as curvas comparativas entre os resultados do ensaio na PCI do Caso C versus os resultados calculados pelo método Allis-Chalmers a curva evidencia boa aderência entre os dois métodos para umidades superiores a 3%. Em geral o método empírico de dimensionamento e seleção de peneiras da Allis-Chalmers para os minérios de ferro típicos Casos A, B e C apresentou uma boa correspondência aos resultados obtidos nos ensaios, assim pode ser considerado um recurso útil.

Figura 47: Comparação entre PCI e caso C

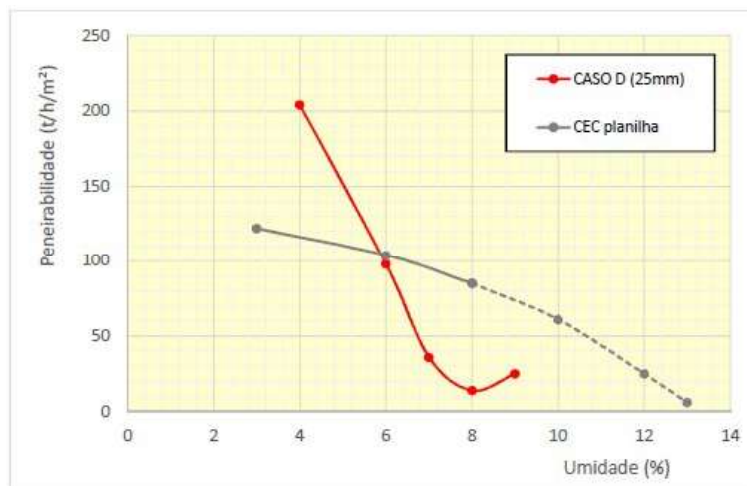


Fonte: Nunes Filho. (2017)

2.21.10. Comparativo Caso D

A Figura 48 apresenta as curvas comparativas de peneirabilidade do ensaio do Caso D e o cálculo feito pelo método Allis-Chalmers. Os resultados do Caso D nos mostram que estimativas do método Allis-Chalmers são excessivamente otimistas para umidades de alimentação superiores a 6%, podendo ocasionar graves desvios no dimensionamento em peneiras industriais.

Figura 48: Comparação entre caso D e CEC

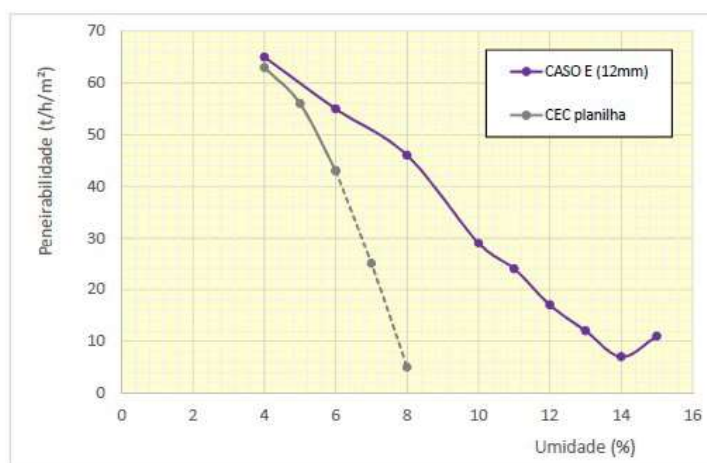


Fonte: Nunes Filho. (2017)

2.21.11. Comparativo Caso E

A Figura 49 apresenta as curvas comparativas de peneirabilidade obtidas no ensaio e o cálculo efetuado de acordo com o método Allis-Chalmers. Ao contrário do Caso D, os ensaios do Caso E mostraram que o método Allis-Chalmers também pode ser bastante pessimista para alguns casos específicos e induzir o responsável pela seleção da peneira a escolher em equipamento muito maior do que o necessário.

Figura 49: Comparação entre caso E e CEC

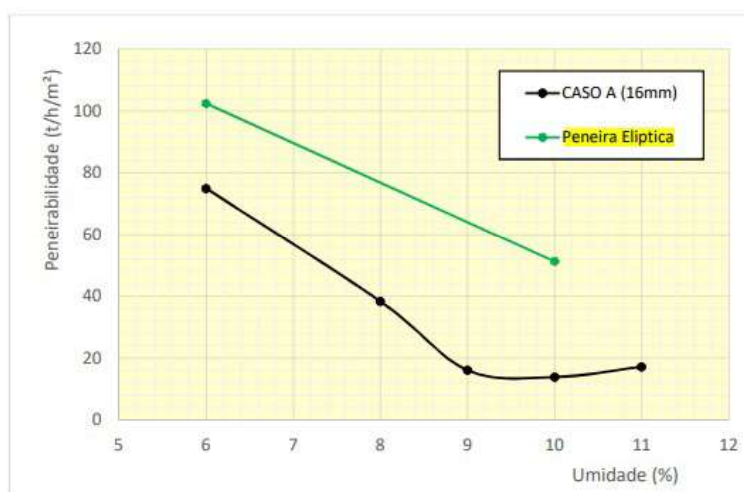


Fonte: Nunes Filho. (2017)

2.21.12. *Comparativo caso A x peneira elíptica e aceleração 5,5 G*

A comparação apresentada na Figura 50 foi realizada utilizando os dados de peneirabilidade obtidos no caso A contra os dados obtidos através da inspeção em peneira industrial banana de movimento elíptico e com aceleração de 5,5 G.

Figura 50: Caso A versus peneira banana



Fonte: Nunes Filho. (2017)

Para o minério com alta umidade, a peneirabilidade alcançada na peneira elíptica foi consideravelmente superior frente a todos os outros modelos. Tal resultado é atribuído à combinação dos seguintes fatores: perfil banana aliado ao movimento elíptico e a maior aceleração.

2.21.13. *Conclusão do caso 1*

Para a realização de comparações de desempenho da PCI e peneiras industriais foram utilizados dados de peneirabilidade obtidos com o minério do caso A, assim como dos desempenhos apresentados por peneiras durante vistorias realizadas no circuito industrial selecionado.

A comparação direta entre a peneirabilidade obtida no caso A e a alcançada na peneira industrial de movimento circular indicou que o tipo de movimento exerce influência determinante no desempenho do peneiramento; com minério com baixa umidade o movimento linear proporciona uma peneirabilidade maior, ao passo que, a peneira industrial de movimento circular proporcionou maior peneirabilidade quando o minério contava com umidade elevada.

Foi realizada uma comparação entre a peneirabilidade do caso A e a obtida em peneira industrial de movimento linear com perfil banana, assim foi evidenciado que o perfil do quadro também exerce influência acentuada no desempenho do peneiramento.

Por fim, os resultados de peneirabilidade do caso A foram comparados aos obtidos na peneira industrial, também de perfil banana, porém com movimento elíptico e maior aceleração. Mais uma vez o comparativo revelou que o tipo de movimento e o perfil do quadro exercem grande influência no peneiramento, como já analisado nos casos anteriores. Não obstante, outro importante parâmetro, a aceleração, demonstrou exercer influência na peneirabilidade.

Para minério com baixa umidade, a peneirabilidade da peneira elíptica foi ligeiramente superior à obtida na peneira banana de movimento linear. Já para o minério com alta umidade, a peneirabilidade alcançada na peneira elíptica foi consideravelmente superior frente a todos os outros modelos. Tal resultado é atribuído à combinação dos seguintes fatores: perfil banana aliado ao movimento elíptico e a maior aceleração.

Uma conclusão que se pode retirar do estudo de caso 1 é que cada minério responde de forma diferente com relação à umidade e abertura de tela e o tipo de movimento, perfil do quadro e aceleração exercem grande influência no peneiramento.

2.22. Exemplo 02

Comparação de performance entre telas de poliuretano autolimpantes e telas de aço aplicadas em peneiramento a umidade natural de minério de ferro – Ferreira A. Eustáquio;

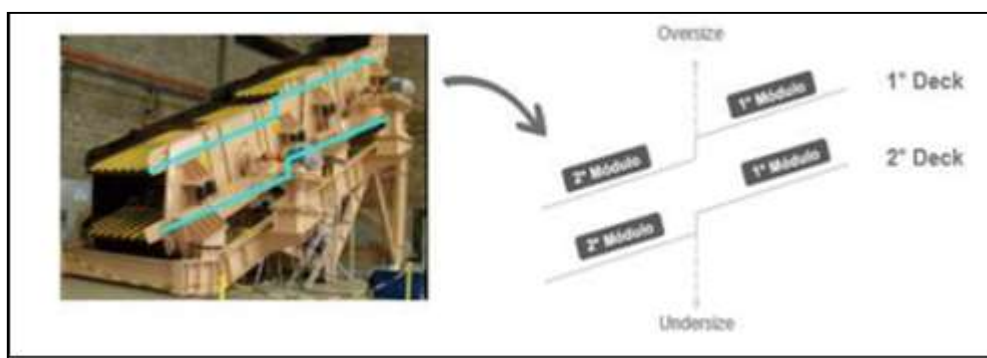
Rodrigues R. Carlos; Oliveira T. Ribeiro – Artigo publicado na Brazilian Journal of Development – 2023.

Este artigo traz os principais resultados comparativos obtidos substituindo os módulos de telas em peneiras vibratórias de aço, material comumente utilizado nesse processo, por telas de poliuretano (PU) em uma usina de beneficiamento de ferro a umidade natural (sem o uso de água de lavagem ou material em polpa), na etapa de peneiramento secundário, no complexo minerador de Carajás localizado no sudeste do estado do Pará.

Assim, considerando as vantagens e desvantagens de cada tipo de tela, o objetivo desse estudo foi realizar uma comparação do desempenho operacional entre os dois materiais, aço e PU, aplicados ao peneiramento em mineração de ferro a umidade natural, buscando melhoria contínua de processos e segurança.

No caso deste artigo, o equipamento utilizado para teste foi uma peneira vibratória modular inclinada, excêntrica, composta por dois módulos e dois *decks*, conforme a Figura 51, somando 4 módulos por peneira e cada módulo comportando 80 telas sendo 320 no total. Os resultados foram medidos com base no segundo *deck*, mantendo o primeiro padronizado.

Figura 51: Modelo da peneira utilizada

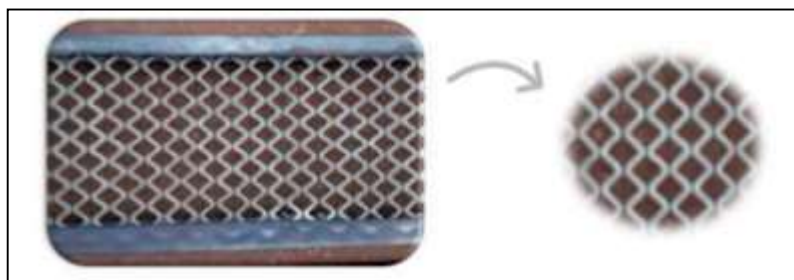


Fonte: Ferreir. (2023)

Para os resultados apresentados nesse artigo, as telas comparadas no teste foram aplicadas no segundo *deck* e de dois tipos: uma de aço com formato ou perfil em losango e uma de poliuretano (PU) com formato retangular aliado a característica autolimpantes que lhe confere um perfil semelhante a letra “H”, conforme mostrado nas Figuras 52 e 53 abaixo.

A abertura dos dois tipos de telas foi de 19 mm e, para fins de identificação, será considerada a peneira com telas de aço como Linha A e a peneira com telas de PU como Linha B.

Figura 52: Tela de aço com perfil losango (Linha A)



Fonte: Ferreira. (2023)

Figura 53: Tela de PU com perfil "H" retangular (Linha B)



Fonte: Ferreira. (2023)

O teste realizado teve duração de 30 dias (um mês) utilizando duas peneiras iguais, conforme a Figura 52 e com as mesmas condições de operação. A alimentação das duas peneiras foi realizada através do mesmo silo, apenas com uma divisão igualitária de fluxo entre as duas linhas de teste, garantindo que o mesmo material alimentasse ambas.

2.22.1. Resultados

2.22.2. Área aberta

A área aberta é a principal desvantagem das telas de poliuretano frente as telas de aço, visto a redução de 3,3 %, conforme Figura 54.

Figura 54: % de área aberta

Tipo de Tela	Aço (A)	Poliuretano (B)
Área aberta	46 %	42,7 %

Fonte: Ferreira. (2023)

2.22.3. Taxa de alimentação

O resultado positivo da tela de poliuretano, com um aumento de 24 t/h de taxa média mensal em relação ao resultado da tela de aço é bastante interessante, porque mostra que apesar de operar com menor área aberta que a Linha A, a Linha B ainda obteve um resultado superior, a Figura 55 traz esse resultado. Esse ganho total de 3% reflete tanto a característica autolimpantes das telas de PU perfil “H”, uma vez que mesmo com a área aberta maior as telas de aço têm maior tendência a cegar ou entupir, quanto a vida útil que envolve parada da alimentação para troca das telas defeituosas.

Figura 55: Gráfico indicando a taxa de alimentação das duas linhas



Fonte: Ferreira. (2023)

2.22.4. Tempo de vida útil

Durante os 30 dias de teste, todas as telas de Aço da Linha A tiveram o fim de sua vida útil entre 18 e 25 dias de teste, sendo trocadas sempre que identificados eventos de desgaste ou rompimento nas inspeções.

Por outro lado, as telas de PU da Linha B não foram trocadas nenhuma vez durante o teste. Não se identificou eventos de deformação ou rompimento mesmo realizando a mesma frequência de inspeção performada na Linha A.

Após 151 dias de operação houve o rompimento de telas na Linha de PU e identificados diversos sinais de deformação por impacto, o que já implicava em contaminação e perda da especificação do produto.

O resultado mostra que as telas de poliuretano possuem vida útil 6 vezes maior que a de aço, sendo este um resultado experimental que é equivalente ao valor fornecido pela bibliografia M&T (2016).

Os ganhos financeiros podem ser vistos na Figura 56, na qual se tem os ganhos das telas de poliuretano em relação às de aço.

Figura 56: Ganhos financeiros



Fonte: Ferreira. (2023)

Outra análise importante a ser realizada é quanto a sustentabilidade e geração de sucata. Com as telas de aço, em 1 mês, seriam descartadas cerca de 320 telas em forma de sucata metálica e extrapolando para os 5 meses o valor supera 2000. Para os mesmos períodos

considerando as telas de PU, em 1 mês não haveria descarte de telas e com 5 meses seriam cerca de 300. A Figura 57 traz de forma visual tais informações.

Figura 57: Número de telas descartadas ao longo do tempo



Fonte: Ferreira. (2023)

Também é válido pontuar que eventos de queda de tela só foram identificados na Linha A com telas de aço, sendo um problema recorrente em peneiras vibratórias com telas não pinadas. Já as telas de PU, por apresentarem maior flexibilidade, não tiveram esse comportamento.

Devido à característica autolimpantes das telas de PU perfil “H” notou-se uma redução no tempo de limpeza quando comparado com as telas de aço, que tendem a cegar ou entupir. O tempo médio padrão cadastrado para limpeza das telas de aço foi de 5 minutos, enquanto com as telas da Linha B o valor médio foi de 3 minutos.

2.22.5. Conclusão do caso 2

As vantagens de custo mais baixo e maior área aberta das telas de aço quando comparadas às das telas de poliuretano não são sustentáveis a longo prazo. As telas de PU, possuem vida útil 6 vezes maior e, dessa forma, mesmo sendo mais caras, em um mês já são mais vantajosas financeiramente contribuindo para um melhor custo benefício. Eventos de rompimento, queda e desgaste das telas de aço fazem com que seja necessária a substituição das mesmas entre 18 e 25 dias de uso. Além disso, esses eventos nas telas de aço afetam direta-

mente a disponibilidade e utilização física das peneiras e interferem na produtividade desses equipamentos no geral.

Ainda, a ligeira vantagem de 3% de área aberta para as telas de aço também não impediu que os resultados da taxa de alimentação para a linha de PU fossem superiores. Os resultados quanto a sustentabilidade através da geração de resíduos, como as sucatas de telas metálicas descartadas, segue igualmente o mesmo padrão, com grande vantagem para as telas de PU que chegam a reduzir esse valor em cerca de 87%.

Dessa forma, é visto de forma clara a necessidade do constante desenvolvimento das operações mineiras. A substituição do material das telas de peneiramento promoveu um ganho significativo para o processo e lucratividade.

Assim, a importância de testes industriais e melhoria contínua dos processos devem ser constantes, ou seja, novos materiais, novos formatos e configurações são exemplos do que se pode fazer para o desenvolvimento no peneiramento.

3. METODOLOGIA

Nesse capítulo estão abordadas tanto a metodologia da pesquisa quanto a metodologia experimental. Dentro da metodologia da pesquisa, foram evidenciadas suas classificações levando em conta o método, os objetivos, os campos da ciência e os procedimentos. Dentro da metodologia experimental, foram abordados os procedimentos experimentais utilizados para preparação, caracterização do minério, testes de umidade, densidade, índice de forma, granulometria, além dos materiais utilizados. Esses procedimentos foram realizados na CBMM, pela Gerência Técnica de Mineração.

O presente trabalho desenvolveu um processo de peneiramento a seco com um limite de granulometria e umidade através de estudos teóricos e práticos, visando realizar um escalpe na nova linha de alimentação do pátio de homogeneização da empresa CBMM.

A pesquisa se encaixa no método hipotético-dedutivo, pois ela se baseia na construção de premissa fundamentada em hipótese e que possui probabilidade alta de ser verdadeira.

Quanto aos objetivos foi explicativa, pois identificou fatores através de métodos experimentais que permitiram a manipulação das variáveis, tais como: granulometria, densidade, índice de forma, taxa de alimentação e umidade natural e pós-desmonte, relacionados com o objeto em estudo.

Em relação aos campos da ciência ela foi interdisciplinar, pois envolveu várias disciplinas e integrou conhecimentos entre elas.

Os procedimentos foram os experimentais e levantamentos bibliográficos. Trata-se de experimental, pois envolve experimentos e determina o objeto de estudo, e bibliográficos, pois utilizou da bibliografia para levantar as possíveis estruturas e componentes que auxiliam no peneiramento a seco.

Portanto, ela consistiu, primeiramente, em coletar informações do minério necessárias para dimensionar a peneira. Em sequência fez-se o dimensionamento da peneira através de métodos específicos e, analisou se uma peneira de escalpe pode ser empregada nessa nova linha, além de verificar as condições técnicas do peneiramento.

3.1. Distribuição Granulométrica do minério.

Foi realizado o levantamento da distribuição granulométrica por meio de peneiramento a seco representativa de todo o minério da mina para dimensionamento da peneira. Essa amostragem foi realizada pela empresa em seu laboratório através de método específico.

3.2. Cálculo da densidade aparente

A determinação da densidade aparente, em base seca, consiste na medida do volume de uma determinada amostra do minério e pesagem da mesma, (SAMPAIO e SILVA, 2007). A campanha de determinação da densidade “in situ” e base seca minério aflorante na mina vem sendo realizada desde setembro de 2012.

O procedimento utilizado na amostragem e determinação da densidade “in situ” é regulamentado por documento interno da empresa – “Determinação de densidade in situ com emprego do frasco de areia” que faz referência à NBR 7185/1986 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Consiste basicamente na determinação do volume de um furo executado no campo, com dimensões conhecidas, por meio da massa de areia de densidade conhecida, que preenche esse furo. De posse desse volume, a densidade do material é determinada dividindo-se a massa do material pelo volume do furo. Além disso, o material proveniente do campo é seco em estufa, determinando-se assim a densidade aparente do material também em base seca. É este último resultado que é utilizado para o cálculo da massa do minério alimentado nas usinas de beneficiamento.

O banco de dados de densidade utilizado no presente trabalho conta com 11.023 amostras obtidas no minério atualmente alimentado nas concentrações.

3.3. Cálculo da umidade *in situ*

O ensaio realizado para sua determinação ocorre conforme DAER/RS (2001) e é realizado basicamente pela diferença de peso do material antes e após a sua secagem na estufa.

Os sistemas particulados carregam entre suas partículas, uma quantidade de água de forma “natural”. A esta quantidade de água carregada de maneira natural é chamada de “umidade natural”, uma vez que, não foi acrescentada de forma não natural certa quantidade de água. Assim sendo, a umidade natural será definida como a massa de água existente no material em relação a massa total do sistema. O cálculo será feito através da Equação 16.

$$m = W_a/W_m; \quad \text{Eq. 16}$$

onde:

m: umidade

W_a : Massa de água

W_m : Massa total do material.

Importante lembrar que os valores são sazonais, ou seja, dependem fortemente da época do ano em que são obtidos.

3.4. Índice de forma

O índice de forma foi analisado segundo metodologia Poole et al. (1998), a partir da contagem de irregulares e regulares.

Desse modo, uma partícula “não-cúbica” (irregular) pode ser considerada aquela cuja razão entre o seu comprimento e largura seja superior a 3 (relação > 3/1). O índice corresponde ao quociente da massa das partículas não- cúbicas pela massa da amostra.

Para o cálculo do índice de forma foram coletadas 10 amostras selecionadas dentro de um espectro amostral de três pilhas confeccionadas via pátio de homogeneização, as amostras foram retiradas das pilhas 010123, 020123 e 030123. Após a seleção dos fragmentos foi realizada uma limpeza nas mesmas para assim realizar suas medidas e pesar suas respectivas massas.

Entende-se que essa amostragem para definição do índice de forma não é representativa dos materiais que irão ser alimentados na nova linha para formação das pilhas. Como os materiais estão em subsuperfície, difíceis de serem amostrados, sem garantia da integridade do material, adotou-se as informações geradas como premissas para o dimensionamento.

3.5. O valor de umidade do material após desmonte e carregamento.

Uma variável que influencia na performance do peneiramento é a condição meteorológica, pois o produto peneirado pode se comportar de forma diferente quando submetido à umidade provocada pelas chuvas em determinados períodos no ano.

Assim sendo, um dado de extrema importância para realização deste trabalho é o valor de umidade da amostra, pois é através da diferença de seus valores que foi possível demonstrar os diferentes comportamentos do material no processo de peneiramento.

O ensaio realizado para sua determinação foi conforme especificação técnica proposta por DAER/RS (2001), mostrada abaixo. Este método fixa o modo pelo qual se determina a umidade de solos e agregados em laboratório.

A amostragem na torre do pátio de homogeneização da CBMM é feita automaticamente por dois amostradores lineares, ou corta-fluxo de trajetória retilínea ilustrado na Figura 58, com intervalo de trinta minutos entre cada amostra para caracterização da pilha homogeneizada. Cada incremento representa uma passagem pelo fluxo, sendo que o material descarregado no chute que alimenta o amostrador secundário se refere a dois cortes do amostrador primário (ida e volta). A caracterização de umidade foi feita com o auxílio de uma balança de cálculo de umidade, onde com o intervalo de duas horas entre cada amostra, uma coleta de 100 g foi separada em saco plástico para realizar o teste de umidade.

Figura 58: Amostradores corta fluxo primário e secundário na torre de amostragem da CBMM



Fonte: SILVA. (2019)

Foram realizados dois testes de umidade, mas quando a diferença entre os testes foi maior que 5% um terceiro teste se fez necessário. Para o cálculo da umidade do ROM desmontado e alimentado na homogeneização foi seguido o seguinte processo.

Foram realizadas duas amostragens de duas em duas horas para se ter a umidade desse período de duas horas, conforme descrito acima, os dados coletados alimentaram uma planilha de Excel que calculou a umidade por turno de serviço. Depois de realizado a amostragem durante um ano uma nova planilha foi elaborada onde consta a umidade por turno de cada pilha.

3.6. Metodologia para dimensionamento da peneira

A alimentação nova da usina será de 4.000 (t/h), a malha de corte do projeto da tela da peneira foi de 50 mm, o projeto será em circuito aberto com um britador de rolos com abertura de 50 mm, parâmetros iniciais do projeto determinados pela empresa (CBMM).

O dimensionamento da peneira é realizado calculando a área de peneiramento e posteriormente a largura e comprimento da peneira. Foi realizado por dois métodos de dimensionamento de peneiras que são tradicionalmente empregados nos projetos de fabricação de peneiras. O primeiro deles foi desenvolvido há décadas e desde então foi e ainda é bastante aplicado em projetos em todo o mundo. O método denominado “Allis-Chalmers” (MAC), encontra-se na literatura clássica da Allis Minerals System (ALLIS-CHALMERS, 1953), pode ser encontrado também em Metso (2005), Chaves e Peres (2012) ou em Hilden (2008). O segundo método proposto por “Peter King” (MPK) (KING, 2001), é baseado num conceito muito parecido ao de “Allis-Chalmers”, que apresenta uma metodologia para o cálculo das distribuições granulométricas dos fluxos de *oversize* e *undersize*.

3.7. Análise através de engenharia reversa da peneira de escalpe (CBMM)

A empresa apresentou as características de uma peneira e solicitou a avaliação da referida peneira se atende nas condições do material. A Tabela 10 apresenta as características dessa peneira.

Tabela 10: Dados da peneira fornecida pela empresa

Capacidade Nominal	4.200 t/h
<i>Deck</i>	01 <i>deck</i>
Largura	2.400 mm
Comprimento	6.100 mm
Abertura de tela	50 mm
Frequência	1.800
Ângulo	25°, 15°, 5°
Movimento	Linear
Área de peneiramento	14,64 m²

Fonte: Própria do autor. (2022)

De acordo com o manual da Metso Minerals (2005), para se ter 95% de eficiência deve-se trabalhar com 80% da capacidade calculada. Assim pode-se realizar uma engenharia reversa e calcular em qual eficiência de peneiramento essa peneira trabalha e assumir essa eficiência.

Uma peneira classificadora final, trabalhando para produzir de acordo com especificações rígidas, deverá trabalhar com 90% a 95% de eficiência, porém, na mesma instalação talvez bastem 60 - 70% para uma classificação intermediária. Na maioria dos casos, pode-se considerar a eficiência de 90 a 95% como comercialmente perfeita.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo estão apresentados os resultados de umidade in situ, umidade pós-desmonte, granulometria, índice de forma e densidade aparente, dimensionamento da peneira e análise da eficiência da peneira de escalpe.

4.1. Granulometria do minério ROM

A Tabela 11 apresenta o resultado da análise granulométrica do material.

Tabela 11: Distribuição granulométrica ROM

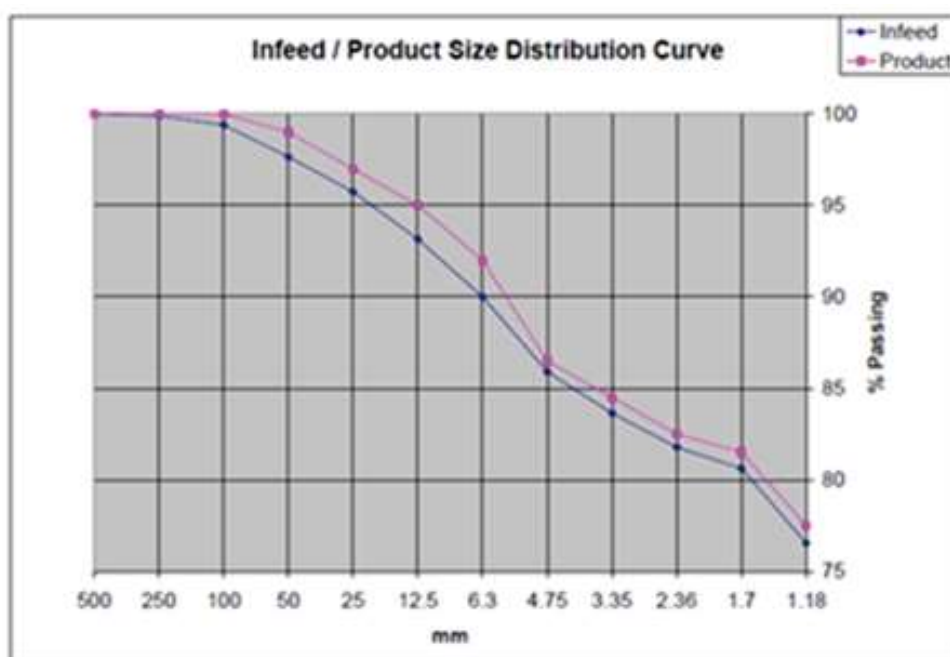
PROJETO PÁTIO DE HOMOGENEIZAÇÃO ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - ROM				
Malha		% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante
#	mm			
-	250	0,12	0,12	99,89
-	100	0,49	0,60	99,40
-	50	1,75	2,35	97,65
-	25	1,90	4,25	95,75
-	12,5	2,60	6,85	93,15
	6,30	3,15	10,00	90,00
4	4,75	4,10	14,10	85,90
6	3,35	2,26	16,36	83,64
8	2,36	1,86	18,22	81,78
10	1,70	1,16	19,38	80,62
14	1,18	4,09	23,47	76,53
20	0,850	5,96	29,43	70,57
28	0,600	4,35	33,78	66,22
35	0,425	3,90	37,68	62,32
48	0,355	4,75	42,43	57,57
65	0,212	6,02	48,45	51,55

100	0,150	5,30	53,75	46,25
150	0,106	5,13	58,88	41,12
200	0,074	3,78	62,66	37,34
270	0,053	3,30	65,96	34,04
325	0,044	2,78	68,74	31,26
400	0,037	2,70	71,44	28,56
<400	<0,037	28,56	100,00	
Total		100,00		

Fonte: CBMM. (2022)

A Figura 59 apresenta a curva de distribuição granulométrica obtida a partir dos dados da Tabela 10, nota-se que a maioria do material (95,75%), se encontra abaixo da faixa de corte que será de 50 mm.

Figura 59:: Gráfico da distribuição Granulométrica



Fonte: CBMM. (2022)

De acordo com a análise granulométrica do minério conclui-se que essa amostra contém muito fino levando-se em consideração o tamanho de corte do peneiramento que será de 50 mm, ou seja, somente 2,35% do material está acima de 50 mm e abaixo de 250 mm.

De acordo com a alimentação nova de 4.000 (t/h) e com a classificação de Chaves e Peres (2012), obtém-se a distribuição da relação partícula versus abertura mostrada na Tabela 12.

Tabela 12: Combinação da análise granulométrica

ANÁLISE DA CURVA GRANULOMÉTRICA				
Relação partícula x abertura da tela	$a < d < 1,5a$	$a > d > 0,5a$	$d < 0,5a$	$d \lll 0,5a$
Porcentagem de material (%)	1,75	1,9	95,75	28,56
Material (t)	70,00	76,00	3.830,00	1.142,40

Fonte: Própria do autor. (2022)

Dentro da faixa ($a < d < 1,5a$), encontra-se as partículas que mais entopem a peneira que são as dentro dos tamanhos de $50 \text{ mm} < d < 75 \text{ mm}$ em torno de 1,75% da amostra. Pode-se assim concluir que o quantitativo dessa massa com relação à alimentação é pequeno em torno de 70 (t/h).

Dentro da faixa ($a > d > 0,5a$), encontram-se as partículas que mais necessitam de sucessivas chances de passar na peneira, que são em torno de 1,90%. Pode-se assim concluir que o quantitativo dessa massa com relação à alimentação é em torno de 76 t/h.

Dentro da faixa ($d < 0,5a$), encontram-se as partículas que são em torno de 95,75%. Pode-se assim concluir que o quantitativo dessa massa com relação à alimentação é grande, em torno de 3.830 t/h.

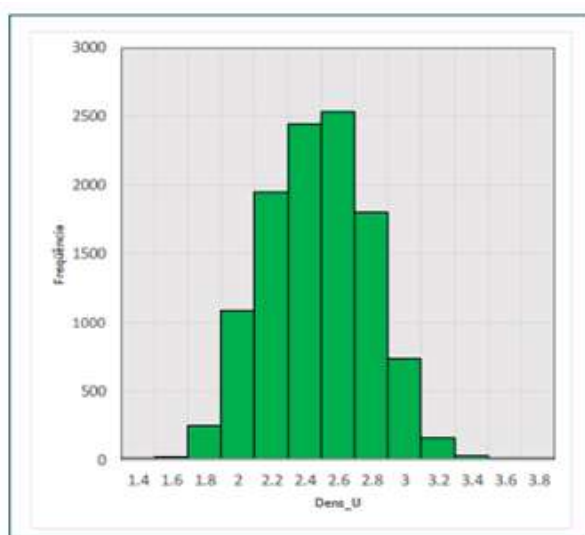
Porém existem as partículas superfínas $d \lll 0,5a$ – essas partículas são responsáveis pela baixa eficiência da peneira por passar para o *oversize* e também por causar o entupimento das telas. Dentro dessa faixa encontram-se as partículas que são em torno de 28,56%. Pode-se assim concluir que o quantitativo dessa massa com relação à alimentação é grande e em torno de 1.142,70 t/h.

4.2. Densidade *in situ*

De acordo com Sales (2020), quanto menor a densidade aparente, maior o volume ou vazão volumétrica ocupada pelo material sobre o *deck* da peneira, consequentemente maior a dificuldade do peneiramento.

A densidade aparente *in situ* é a aquela do material com umidade natural. A Figura 60 apresenta o histograma da densidade aparente *in situ* e a Tabela 13 os dados da densidade aparente média *in situ* que serão usados para o dimensionamento da peneira.

Figura 60: Histograma da densidade aparente *in situ* (g/cm^3)



Fonte: CBMM. (2022)

Tabela 13: Densidade *in situ* (g/cm^3)

Densidade " <i>in situ</i> " (g/cm^3)	
Média	2,38
Mediana	2,38
Moda	2,61
Desvio Padrão	0,31
Mínimo	1,19
Máximo	4,47
Contagem	11023,00

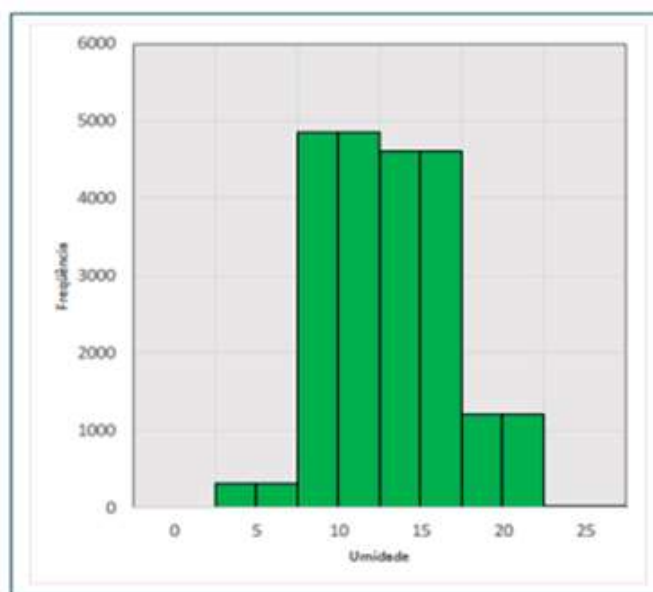
Fonte: CBMM. (2022)

Os cálculos das peneiras levam em consideração uma densidade de 1,6 g/cm³, de acordo com o fator de correção da fórmula K10 do modelo de Peter King (MPK) em (KING, 2001), como se pode observar a densidade do minério aqui estudado é de 2,38 g/cm³, ou seja, 48,75% mais denso. Isso é um bom resultado, pois os cálculos são feitos por volume de material e um material com densidade maior gera um volume menor e por consequência uma peneira mais robusta, porém com menor área.

4.3. Umidade *in situ*

A Figura 61 apresenta o histograma da umidade *in situ* e a Tabela 14 descreve os dados da umidade calculada do material *in situ* tipo ROM da empresa CBMM, que foi utilizado para o dimensionamento da peneira da nova linha de homogeneização.

Figura 61: Umidade *in situ* (%)



Fonte: CBMM. (2022)

Tabela 14: Umidade *in situ* (%)

Umidade %	
Média	10,63
Mediana	10,27
Moda	16,67
Desvio Padrão	3,42
Mínimo	0,22
Máximo	36,90
Contagem	11023,00

Fonte: CBMM. (2022)

A umidade é a proporção de massa evaporado após a etapa de secagem. De acordo com a umidade *in situ* do minério que é de 10,63% pode-se concluir que o peneiramento em umidade natural seria difícil de acordo com Chaves e Peres (2012). Partindo do material seco e aumentando a umidade do material o peneiramento vai se tornando cada vez mais difícil até praticamente impossível, como ilustrado na Figura 12.

Porém os autores não fizeram essa comparação com a abertura da tela e nem com a granulometria do material onde ficou constatado no estudo de caso 01 que a umidade interfere sim no peneiramento, mas ela não é um dado fixo para todo tipo de material, granulometria e abertura de tela.

4.4. Umidade pós-desmonte

Após essa etapa foi gerado via software MiniTAB uma média de umidade por trimestre para se ter uma noção da variação da umidade por períodos de tempo seco e chuvoso. Os resultados estão descritos na Tabela 15.

Tabela 15: Estatísticas 1º semestre

DADOS	1º Trimestre	2º Trimestre	3º Trimestre	4º Trimestre
Contagem total	117,00	115,00	150,00	145,00
N	117,00	115,00	150,00	145,00
N*	0,00	0,00	0,00	0,00
Média	12,29	12,63	11,70	13,53
EP. Média	0,09	0,14	0,13	0,18
Desvio Padrão	1,00	1,51	1,65	2,24
Mínimo	9,73	8,59	8,35	8,59
Q1	11,58	11,38	10,60	11,87
Mediana	12,22	12,46	11,54	13,10
Q3	12,93	13,84	12,64	15,11

Fonte: Própria do autor. (2022)

Pode-se concluir que existe uma diferença de umidade entre os trimestres e entre a umidade do material *in situ*, o que nos faz concluir que a eficiência do peneiramento irá se alterar ao longo do ano com relação proporcional à umidade. A Figura 62 ilustra uma comparação da umidade *in situ*, (linha amarela) e umidade pós-desmonte:

Figura 62: Gráfico da umidade *in situ* X umidade pós-desmonte.

Fonte: Própria do autor. (2022)

Nessa comparação observa-se que após o desmonte a umidade aumenta significativamente em todos os trimestres avaliados, pode-se observar em porcentagem que esse aumento é mais significativo no 4º trimestre, conforme Tabela 16.

Tabela 16: Comparação entre a umidade *in situ* versus umidade pós-desmonte.

Umidade <i>in situ</i>	Trimestre do ano	Umidade pós-desmonte	% de aumento
10,63	1º	12,29	16%
10,63	2º	12,63	19%
10,63	3º	11,70	10%
10,63	4º	13,53	27%

Fonte: Própria do autor. (2022)

Portanto, de acordo com os dados coletados de umidade pós-desmonte ao longo de um ano o peneiramento deve levar em consideração a umidade natural do minério após desmonte e que essa umidade altera ao longo dos períodos das estações do ano. Sendo assim o equipamento de peneiramento tem que ter como característica a capacidade de se alterar os parâmetros de amplitude e frequência a fim de se evitar perdas de capacidade do peneiramento.

4.5. Índice de forma

O índice de forma de partículas não cúbicas foi determinado e apresentado na Tabela 17 e a Figura 63 exemplifica, a foto de um fragmento coletado e denominada como 8.

Tabela 17: Quadro comparativo para índice de forma.

ROCHA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DIMENSÃO 1 (mm)	140	170	140	240	170	200	140	140	200	205
DIMENSÃO 2 (mm)	130	130	140	160	150	180	110	120	155	150
RELAÇÃO 1x2	1,08	1,31	1	1,5	1,13	1,11	1,27	1,17	1,29	1,37
PESO (Kg)	3,4	3,7	3,4	6,6	3,6	6,7	3	3,2	6,3	6,2
ROCHA RELAÇÃO (1X2) > 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ROCHA RELAÇÃO (1X2) < 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Própria do autor. (2022)

Figura 63: Foto do fragmento 08 e suas dimensões



Fonte: Própria do autor. (2022)

De acordo com os fragmentos cuja relação entre a razão da dimensão 1 e dimensão 2, é inferior a 3 pode-se chegar à conclusão que os fragmentos presentes no minério hora amostrado são tidos como relativamente cúbicas em 100% da amostra, a Tabela 18 mostra os resultados. Porém não se pode confirmar que 100% dos fragmentos serão não-lamelares nessas condições, fragmentos com condições lamelares podem aparecer, no entanto de acordo com a teoria aqui apresentada um percentual de até 15% é aceito para o cálculo da peneira.

Tabela 18: Cálculo do índice de forma de partículas irregulares

CÁLCULO DO ÍNDICE DE PARTÍCULAS	TOTAL
ROCHA RELAÇÃO (1X2) < 3	10
ROCHA RELAÇÃO (1X2) > 3	0
PESO TOTAL (Kg)	46,1
ÍNDICE DE PARTÍCULAS NÃO CÚBICAS	0%
ÍNDICE DE PARTÍCULAS CÚBICAS	100%

Fonte: Própria do autor. (2022)

4.6. Avaliação das características da peneira para o minério de pirocloro

A Tabela 19 apresenta os melhores meios de peneiramento a seco para as características do ROM de acordo com a bibliografia mencionada. As peneiras indicadas para esse ma-

terial são peneira tipo banana com movimento elíptico, peneira vibratória de classificação e grelha ou peneira vibratória para escalpe.

Tabela 19: Melhores meios de peneiramento a seco

TIPO DE PENEIRA	TIPO DE ABERTURA DE TELA	TIPO DE MATERIAL DA TELA	TIPO DE MOVIMENTO	SISTEMA DE LIMPEZA
1 - BANANA	RETANGULAR 3 X 1	1 - POLIURETANO	1 - ELÍPTICO	1 - TELAS AUTO-LIMPANTES
2 - VIBRATÓRIA		2 - BORRACHA	2-3 - CIRCULAR	X
3 - GRELHA		3 - AÇO		X

Fonte: Própria do autor. (2022)

4.6.1. Peneira tipo Banana com movimento elíptico

Segundo Nunes Filho (2017), o movimento elíptico é um movimento intermediário entre o circular e o linear, que conciliou o benefício da baixa tendência ao entupimento proveniente do movimento circular com a maior capacidade proveniente do movimento linear. A peneira elíptica ainda pode trabalhar com qualquer inclinação de *decks*, o que resulta em maior flexibilidade de operação. Assim a peneira elíptica permite controlar o tempo de peneiramento do material sobre o *deck*, mediante variação do ângulo de lançamento, e com isso melhora a eficiência durante períodos com alimentação de minérios úmidos. Isso pode ser feito simplesmente através do aumento no ângulo de lançamento das partículas (por exemplo, a 60° de inclinação), o que aumenta o tempo de residência do material sobre o *deck*. Já nos períodos de minério seco, é possível fazer o processo inverso.

4.6.2. Peneira Vibratória de classificação

Segundo Nunes Filho (2017), as peneiras vibratórias de classificação são muito similares as de escalpe trabalhando com uma faixa de alimentação que variam de 50 mm até 200

mm. As peneiras possuem o movimento circular com características importantes, pois nesse regime as partículas recebem forças em todos os sentidos, implicando menor probabilidade de ficarem presas na tela de peneiramento.

4.6.3. *Grelha ou peneira vibratória para escalpe*

De acordo com Chaves e Peres (2012), as grelhas vibratórias são equipamentos extremamente robustos, pois recebe o minério ROM, que pode ter matacões pesando algumas toneladas. O comprimento desses equipamentos é encurtado para aumentar a resistência à flexão e evitar danos prematuros e a inclinação é maior que o convencional para auxiliar o rolamento dos blocos para frente. A grelha vibratória dispõe de mecanismo de vibração e é usada em separações entre 50,8 mm (2") e 152,4 mm (6").

O objetivo de sua instalação não é uma separação eficiente dos finos e dos grossos, mas desviar certa quantidade de finos do britador e, assim, evitar abrasão e desgaste do mesmo. Assim, a eficiência é uma consideração secundária e as grelhas vibratórias trabalham com eficiência entre 60% e 70% (CHAVES e PERES, 2012).

Segundo Peter (2011), escalpe é estritamente a remoção de uma pequena quantidade de tamanho excessivo de material constituído predominantemente por finos. O escalpelamento geralmente consiste na remoção de *oversize* de uma alimentação com um máximo de 5% de *oversize* e um mínimo de 50% de metade do tamanho. O escalpelamento grosso é tipicamente menor que 150 mm (6") e maior que 50 mm (2").

4.6.4. *Avaliação do movimento da peneira*

Segundo Nunes Filho (2017), o movimento elíptico está entre o circular e o linear, assim ele concilia o benefício da baixa tendência ao entupimento proveniente do movimento circular com a maior capacidade proveniente do movimento linear. Enquanto o movimento

circular possui características importantes, porque nesse regime as partículas recebem forças em todos os sentidos o que implica menor probabilidade de as partículas ficarem presas na tela de peneiramento e entupimentos por causa da característica do material estudado ser muito fino.

4.6.5. Avaliação do tipo de tela

Segundo Nunes Filho (2017), uma variável muito importante na definição da peneira é o tipo de tela a ser empregado, e uma das tecnologias desenvolvidas são as telas que utilizam uma mescla de materiais, como por exemplo, as autolimpantes. Esse modelo combina entre outros um baixo custo e uma maior área livre obtida com aço e uma maior durabilidade e flexibilidade do poliuretano trazendo os benefícios de cada um.

De acordo com Wills (2006), a maior vantagem do poliuretano modular é a resistência excepcional ao desgaste na maioria das aplicações; normalmente 10 vezes a vida útil em relação ao tecido de arame tradicional. Telas modulares não requerem tensão e retensão e se danificado, seções da tela podem ser substituídas in situ. Telas de poliuretano e borracha também são mais silenciosas e as aberturas mais flexíveis reduzem a cegueira em comparação com malhas de arame de aço.

Segundo Peter (2011), a uma grande vantagem das telas de poliuretano é a redução da cegueira, maior vida útil, redução de ruído, resistência ao choque, etc.

Segundo o estudo de caso 02, as telas de poliuretano combinam o maior tempo de vida útil, a maior resistência ao entupimento por partículas finas e a menor relação custo x benefício.

Segundo Nunes Filho (2017), as telas autolimpantes combinam as propriedades do poliuretano, com boa resistência ao desgaste e a maior área livre proporcionada pelo aço as mesmas têm um núcleo interno flexível aumentando a vibração nos filamentos o que inibe o acúmulo de material na superfície da tela.

4.6.6. Avaliação do tipo de abertura

A malha retangular e a malha tripla alongada são as melhores opções, devido ao caso específico do minério por permitir maior vazão e cegamento mínimo, apesar da precisão ser menor, que no caso específico de escalpe é tolerável.

4.6.7. Avaliação do sistema de limpeza das telas

Quando as telas entopem durante a operação de peneiramento de agregados e minérios, a produção pode cair abaixo do planejado. Esse problema pode acontecer no processamento de materiais com alto teor de umidade, ou na escolha inadequada do tipo de tela utilizada. Por entender que essas situações impactam na produtividade e chegam a custar milhões de reais por ano em receita.

A instalação de telas autolimpantes, tensionadas ou modulares, módulos de tela de borracha de alta resiliência, são as maneiras mais fáceis de eliminar os problemas de obstrução de malhas”, explica Duarte (2022). Ambas as soluções maximizam a ação de peneiramento, para que o material de tamanho adequado passe ao invés de obstruir as telas. Em alguns casos o aumento de produção é tão significativo, que pode ser observado no volume de material que está sobre os transportadores de correia.

4.7. Dimensionamento da peneira

Os cálculos foram realizados levando-se em conta os parâmetros coletados nas informações da empresa sobre o peneiramento e nas características do minério. A Tabela 20 apresenta os parâmetros utilizados para o cálculo da peneira utilizando os dois métodos, Allis-Chalmers e MPK.

Tabela 20: Parâmetros utilizados no cálculo da peneira

PARÂMETROS PARA CÁLCULO DA PENEIRA (ROM)	
TAXA DE ALIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS (t/h)	4.000
ABERTURA DA TELA (mm)	50
DENSIDADE APARENTE(t/m ³)	2,38
ÁREA ABERTA (%)	50
PASSANTE NA METADE DA ABERTURA (%)	95,75
PASSANTE NA ABERTURA (%)	97,65
RETIDO ACUMULADO NA ABERTURA (%)	2,35
TIPO DE TELA	POLIURETANO
INCLINAÇÃO DA PENEIRA (graus)	25
ALTURA NA CAMADA DE DESCARGA (mm)	200
UMIDADE (%)	10,63
FATOR DE PROJETO	1
TIPO DE PENEIRAMENTO (SECO OU ÚMIDO)	SECO
FORMA DA ABERTURA	RETANGULAR (3x1)
TEOR DE PARTÍCULAS ALONGADAS > 15%	0
VELOCIDADE DO FLUXO (m/min)	45
NÚMERO DE CAMADAS	4
TIPO DE PENEIRA	BANANA

Fonte: Própria do autor. (2022)

4.7.1. Dimensionamento da peneira utilizando o método Allis-Chalmers

De acordo com o método Allis-Chalmers, a área de peneiramento é calculada pela Equação 02. A Tabela 21 apresenta os cálculos da CEC, ou seja, $C^* M^* K^* Q1^* Q2^* Q3^* Q4^* Q5^* Q6$, resultando em 124,42 m³/h/m². Multiplicando esse valor pela densidade média aparente do material que é de 2,38 t/m³ igual a 296,12 m³/h/m².

Tabela 21: Fatores de correção *Allis-Chalmers*

FATORES DE CORREÇÃO Allis-Chalmers	
FATOR C	46
FATOR M	0,92
FATOR K	2
Q ₁	1
Q ₂	1
Q ₃	1
Q ₄	1
Q ₅	1,05
Q ₆	1,4
TOTAL	124,42

Fonte: Própria do autor. (2022)

Utilizando a Equação 02 e realizando os cálculos conclui-se que a área é igual a 13,50 m², importante frisar que os cálculos foram realizados utilizando uma umidade de 8%, pois o método não é recomendado para materiais com umidade superior a 8%, o que é muito abaixo da umidade do material estudado que é de 10,63 %. Portanto esse cálculo nos dá somente uma referência de valor preparatório para dimensionar a peneira, pois de acordo com o método aqui apresentado minérios com teores acima de 8% devem ser utilizados outros métodos de dimensionamento de peneiras. Portanto esse método não é recomendado para este caso.

4.7.2. *Dimensionamento da peneira utilizando o método MPK*

Diferente do método anterior, MPK considera a aplicação de praticamente todos os parâmetros e fatores na forma algébrica.

Utilizando a Equação 03 para o cálculo de WUF;

$$WUF = 0,783a + 37 \quad \text{Se } a > 25 \text{ mm, então:}$$

$$WUF = 0,783 \cdot 50 + 37, \text{ portanto } WUF = 76,15 \text{ t/h/m}^2$$

Deve-se no segundo passo calcular a capacidade unitária corrigida utilizando os fatores de correção da Tabela 22. Assim os cálculos de K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 , K_6 , K_7 , K_8 , K_9 e K_{10} , resultando em 2,75, portanto WUF corrigido é igual a 209,41 t/h/m².

Tabela 22: Fatores de correção do MPK

FATORES DE CORREÇÃO DO MPK	
K_1	2,12
K_2	0,95
K_3	1
K_4	1
K_5	1
K_6	1
K_7	0,85
K_8	1,2
K_9	0,9
K_{10}	1,49
TOTAL	2,75

Fonte: Própria do autor. (2022)

Utilizando a Equação 03 do cálculo de área e realizando os cálculos conclui-se que a área é de 19,13 m².

Assim, o próximo passo é definir o comprimento e largura da peneira. De modo geral, todos os métodos determinam a largura da peneira considerando a altura limite da camada de material na descarga da peneira. Recomendado pela maioria dos fabricantes de peneiras, a altura de camada de material na descarga deve ser, no máximo, quatro vezes o tamanho da abertura da tela. A Equação 13 apresentou o cálculo da altura desta camada, em função, principalmente da largura da peneira. Assim a largura mínima é 1m.

Para se calcular a eficiência de peneiramento, deve calcular inicialmente a relação de classificação RR, de acordo com a Equação 14 apresentada. Assim a relação de classificação $RR = 0,83$.

A eficiência do peneiramento (transmissão) pode ser expressa pela Equação 15. Assim a eficiência do peneiramento é $E = 0,94$ ou 94,00%. A Tabela 21 apresenta o resultado pelos dois métodos:

Tabela 23: Resultado dos cálculos

ÁREA DA PENEIRA (m ²)	
ALLIS-CHALMERS	13,50
MPK	19,13
LARGURA MÍNIMA	1,00

Fonte: Própria do autor. (2022)

O primeiro método utilizado de Allis-Chalmers aceita ser calculado até uma umidade de 8%, o que para o nosso caso não representa a característica da umidade in situ do minério que é de 10,63%, servindo assim somente como um comparativo com o outro método utilizado. O segundo método utilizado de MPK não leva em consideração a porcentagem de água no minério, somente se ele é seco ou úmido, conforme Tabela 23. Assim o cálculo foi apresentado como sendo a área da peneira ideal para o minério estudado.

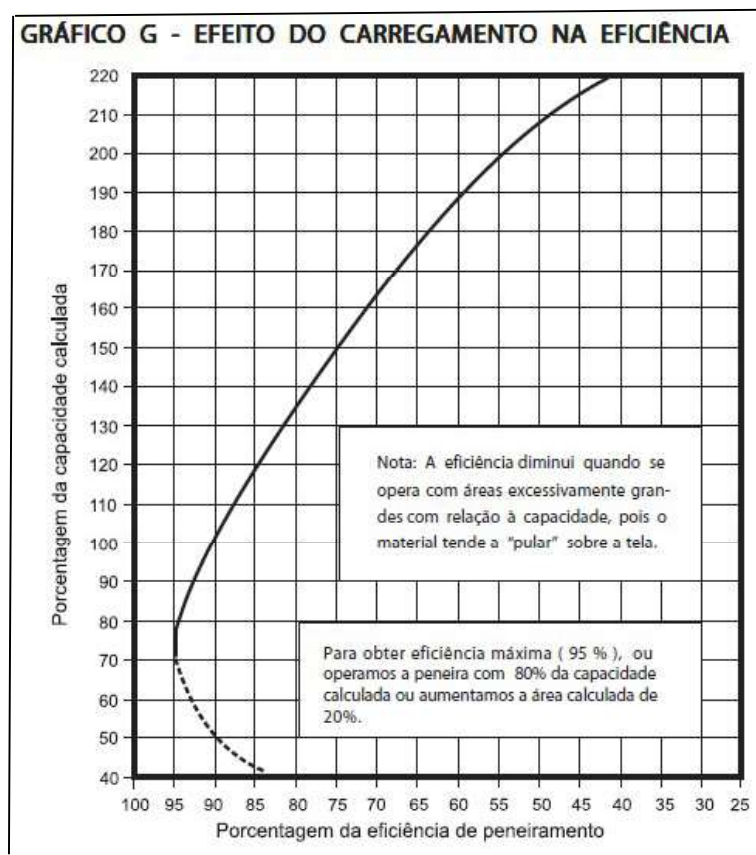
4.7.3. *Análise através de engenharia reversa da peneira de escalpe (CBMM)*

A nova linha de peneiramento da empresa será atendida por um britador de capacidade de 1.750 t/h, que será alimentado pelo *oversize* do peneiramento. A empresa apresenta uma peneira vibratória de 2,4 m x 6,1 m, com área de peneiramento de 14,64 m², tipo banana e movimento linear, de uma empresa específica conforme Tabela 22. Analisando se essa peneira pode trabalhar como uma peneira de escalpe para essas condições.

A nova linha será de 4.000 t/h e pode-se desviar até 1.750 t/h para o britador, utilizando a peneira como escalpe, ou seja, 43,75% do material pode ser desviado.

Utilizando de engenharia reversa pode-se calcular qual será o novo WUF corrigido e também qual será a nova eficiência do peneiramento com uma peneira de área menor. Assim de acordo com a Equação 3 já apresentada, onde tem-se a área igual a 14,64 m² pode-se calcular o novo valor de WUF corrigido que será de 273 t/h/m², ante o valor calculado que era de 209 t/h/m², ou seja 30,62% maior. Sendo assim na Figura 64 a capacidade calculada é aumentada em 30,62%, ou seja, no eixo das ordenadas 130%, e no eixo das abscissas encontra-se a nova eficiência do peneiramento que será de 82%.

Figura 64: Efeito do carregamento na eficiência



Fonte: Nunes Filho. (2017)

Assim deve-se calcular a largura mínima se é compatível para atender a especificação de uma altura de camada no máximo 4 vezes a abertura da tela que é de 50 mm, ou seja, a altura de camada deve ser de até 200 mm ou 20 cm.

De acordo com o resultado da Equação 13 a altura de camada no *oversize* será de 0,20 m ou 20 cm, o que torna a largura aceitável. Portanto, a peneira disponível pode ser utilizada; desde que seja aceito a redução de sua eficiência para 82%, porém o melhor movimento para o caso específico é o elíptico e a melhor tela é a de poliuretano com aberturas retangulares.

5. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado teve como objetivos levantar as condições técnicas do peneiramento a seco de um minério em sua umidade natural, com uma determinada abertura de tela. Além disso, realizar o dimensionamento de uma peneira para 95% de eficiência e posteriormente o estudo de uma peneira de escalpe.

A densidade aparente foi de 2,38 t/m³ e a umidade natural do minério de 10,63%. Resultado esse que mostra um peneiramento difícil devido à alta umidade natural. No entanto a umidade do material após desmonte foi: no 1º Trimestre = 12,29%, no 2º Trimestre = 12,63%, no 3º Trimestre = 11,70% e; 4º Trimestre = 13,53%.

A amostragem realizada do índice de forma mostra que no material estudado a forma geométrica predominante é a de quase cúbica revelando que é uma boa característica para o peneiramento uma vez que a forma lamelar é uma forma de difícil peneiramento por obstruir muito as telas.

No caso do levantamento da granulometria, a amostragem nos indica que o material é de bom peneiramento, pois 97,65% do material é passante na tela de peneiramento e 95,75% é passante na metade da abertura da tela e segundo a bibliografia esse material passante na metade da abertura da tela não gera problemas ao peneiramento.

Porém têm-se as partículas superfinais $d \ll 0,5\phi$. Essas partículas são responsáveis pela baixa eficiência da peneira por ficar retida e também por causar o entupimento das telas. Dentro dessa faixa encontra-se as partículas que são em torno de 28,56%. Pode-se assim concluir que o quantitativo dessa massa com relação à alimentação é em torno de 1.142,70 t/h.

Através desse estudo conclui-se que esse é o ponto de atenção para o peneiramento em estudo, sendo assim, o entupimento das aberturas de tela causado pelo material fino associado a umidade natural é o fator prejudicial ao material estudado.

Sendo assim, a bibliografia nos indica que o peneiramento a umidade natural com umidade acima de 8% é inviável e de difícil operação, porém com o emprego de tecnologia

como o movimento elíptico, telas autolimpantes e peneira tipo banana a umidade passa a ser um fator secundário principalmente no caso de peneiramento intermediário a grosso.

Foram utilizados dois métodos de cálculo da peneira, o primeiro método “Allis-Chalmers” deu como resultado uma área de 13,5 m², já o segundo método “MPK” deu uma área de 19,13 m², com eficiência de peneiramento na casa de 94%, porém o valor calculado pelo método Allis-Chalmers não deve ser levado em consideração, pois esse método é indicado para minérios com umidade até 8%.

De acordo com a bibliografia estudada e os estudos de caso, a melhor peneira para o peneiramento aqui dimensionado é a peneira tipo banana, o melhor movimento é o elíptico e o melhor tipo de tela é a de poliuretano, com a área de peneiramento calculada de acordo com o método de MPK de 19,13 m². Também foram apresentadas na bibliografia as telas autolimpantes como uma boa prática no peneiramento, mas como não foi estudado o seu custo benefício, a tela referida fica somente como uma observação e uma característica a ser estudada.

Como a umidade natural do minério é alterada ao longo do ano também foi apresentada a necessidade de a peneira ter um controle da frequência e amplitude para ser trabalhada de acordo com o tempo úmido ou seco de acordo com a umidade do minério apresentada ao longo do ano.

A peneira apresentada pela empresa para trabalhar como uma peneira de escalpe foi avaliada e ela pode ser usada desde que se aceite uma redução de sua eficiência para 82%, o que de acordo com a bibliografia estudada não é uma eficiência baixa, porém vale uma ressalva de que o melhor movimento estudado é o elíptico e a melhor tela é a de poliuretano ou telas autolimpantes.

Por fim as condições técnicas do peneiramento do minério do complexo Alcalino Carbonatítico de Araxá, em umidade natural é considerável e pode ser viável desde que utilize as novas tecnologias apresentadas a fim de se evitar o entupimento das telas da peneira.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

1 – Estudar os efeitos da umidade e diferentes aberturas de tela

Diversos são os autores que estipulam um limite de umidade do material no peneiramento para torná-lo possível, porém não se encontrou quem faz referência até que ponto essa umidade é prejudicial com relação à abertura de tela. Faz se necessário, portanto, correlacionar os efeitos da umidade no material com o limite máximo de abertura de tela.

2 – Realizar trabalho com novos dados quando a mina for explorada no formato de Cava, pois assim os parâmetros do minério irão alterar, tais como umidade, granulometria, densidade, etc.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, T. **Particle Size Measurement**. 5th ed. London: Chapman and Hall, 525p, 1997.

ALLIS-CHALMERS. **Vibrating screen: theory and selection**, Milwaukee, Wisconsin, EUA, 1953.

BOND, F. C., **Crushing and grinding Calculations**. Allis Chalmers Publication, 1961.

BRAGA JÚNIOR, J. M.; BIONDI, J. C. **Geology, Geochemistry, and Mineralogy of Saprolite and Regolith Ores with Nb, P, Ba, Rees (+ Fe) in Mineral Deposits from the Araxá Alkali Carbonatite Complex**, Minas Gerais State, Brazil. 2023 Available at SSRN: Disponível em: <<https://ssrn.com/abstract=4360614>> Acesso em:20/05/2023.

CBMM. Disponível em: < <https://cbmm.com/pt/>> Acesso em 08 de março 2023.

CHAVES, A. P., PERES A. E. C. **Britagem, Peneiramento e Moagem: Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Signus: São Paulo, 2012. v. 3.

CARRISSO, R. C.; CORREIA, J. C. **Tratamento de minérios: classificação e peneiramento**. 3. ed. CETEM: Rio de Janeiro, 2004. Cap.5, p. 209-257.

CORREIA, J. C. G., COUTO, H. J. B. **Tratamento de minérios: classificação e peneiramento**. 6. ed. CETEM: Rio de Janeiro, 2012. cap. 5, p.224-272.

CORREIA, J. C. G. **Tratamento de minérios: classificação e peneiramento**. 5. ed. CETEM: Rio de Janeiro, 2010. cap. 6, p. 257-296.

DANA, J. D. **Manual de mineralogia**. Livros Tecnicos e Cientificos. Rio de Janeiro, RJ, 1974

DAER/RS. **Manual de Ensaios - Determinação do teor de umidade em laboratório**. v. 1., 2001.

DUARTE, A. **Telas entupidas resultam em perdas na receita de pedreiras e mineradoras**. 2022, Disponível em < <https://eaemaq.com.br/noticias-do-mercado/telas-entupidas-resultam-em-perdas-na-receita-de-pedreiras-e-mineradoras/>>. EaeMáquinas. Acesso em 08 março 2023.

GOTOH, K. FINNEY J. **Representation of the size and shape of a single particle**. Powder Technology, 12, p. 125-130. 1975.

GRASSO, C. B. **Geologia e geometurgia dos minérios de fosfato na base do manto de intemperismo da mina do Barreiro**, Araxá: Tese de doutorado nº 126, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 261p, 2015.

GUPTA, A. e YAN D.S. **Mineral Processing Design and Operations: An Introduction**. 1 Edição. Oxford, UK. Elsevier, 2006.

HILDEN, M. M. **A dimensional analysis approach to the scale-up and modelling of industrial screens**. JKMRC, jan. 2008.

KING, R. P. **Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems**. Mineral Technologies, 1ª ed. Inc. 425 South 1000 East Suite 410 Salt Lake City, UT 84102 USA, 2001.

LUZ, A. B.; SAMPAIO J. A.; ALMEIDA, S. L.M. (2010) **Tratamento de minérios**. 5ª ed. CETEM: Rio de Janeiro – MCT, 2010, 963 p.

METSO Minerals, **Manual de britagem**. 6a edição. Sorocaba, São Paulo, Brasil, 2005.

MILHOMEM, F. O. **Modelagem de desaguamento em peneira**. 2017. Dissertação do programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2013.

NUNES FILHO, E. S. **Influência da umidade no dimensionamento e seleção de peneiras vibratórias em instalações de britagem**. 2017. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP; 2017.

OLIVEIRA, T., FERREIRA, A., RODRIGUES, R., BORGES, F., TAVARES, L., & Silva, A. **Comparação de performance entre telas de poliuretano autolimpantes e telas de aço aplicadas em peneiramento a umidade natural de minério de ferro**. Brazilian Journal of Development, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 4524-4537, 2023. DOI: 10.34117/bjdv9n1-311. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/56638>. Acesso em: 7 março 2023.

OGAWA, R. **O desafio de minimizar o uso de água no processo de mineração**. Disponível em: <<https://www.conexaomineral.com.br/noticia/2443/o-desafio-de-minimizar-o-uso-de-agua-no-processo-de-mineracao.html>>. Conexão Mineral. Acesso em 08 março 2023

PETER, D. SME **mining engineering handbook**. 3ª edição. USA, 2011.

PERALTA, M. **Peneiramento: Princípio ou fatores do peneiramento**, 2013. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAop0AD/peneiramentoindustrial-apuntes-aula-parte-2>>. UFOP Acesso em: 07 maio 2022

POOLE, A. B., Sims, I. **Concrete petrography - A Handbook of Investigative Techniques**. 2ª ed. Inglaterra, 1998.

SALES, C. G., **Peneiramento Industrial – Metodologia para dimensionamento e Simulação**. Tese de Doutorado - UFMG, Belo Horizonte - MG, 2020.

SALES, C. G., ROBERTO, R. X., CAMARGO, C., Fazollo, F., Lino, C. R., **Influência dos métodos de peneiramento na caracterização granulométrica das amostras de alimentação da britagem de Brucutu**. 1º seminário de Planejamento de Ferrosos, VALE, Belo Horizonte, MG, 2011.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. **Determinação das densidades de sólidos e de polpa.** IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 37-51.

SHAH, K. P. **Construction, Working and Maintenance of Electric Vibrators and Vibrating Screens, 2018.** Disponível em: <www.practicalmaintenance.net>. Acesso em 18 março. 2017.

SILVA, L. D., **Análise da variabilidade de minério de nióbio e definição de estratégias de amostragem utilizando simulações estocásticas.** Tese de Mestrado - UFRS, Porto Alegre - RS, 2019

SONOKI, I.K., GARDA, G.M. (1988). **Idades K-Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental:** compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. Boletim IG-USP, Série Científica 19: 63-85.

TORRES, M. G. 1996. **Caracterização mineralógica do minério fosfático da mina da Arafertil S. A.,** no complexo carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil.

TRAVERSA, G., GOMES, C.B., BROTZU, P., BURAGLINI, N., MORBIDELLI, L., PRINCIPATO, M.S., RONCA, S., RUBERTI, E. (2001). **Petrography and mineral chemistry of carbonatites and mica-rich rocks from the Araxá complex (Alto Paranaíba Province, Brazil).** Anais da Academia Brasileira de Ciências 73: 71-98.

TRUBBIANELLI, C., **Comparação entre alguns sistemas de vibração das peneiras.** 2021 Disponível em: < <https://pt.linkedin.com/pulse/compara%C3%A7%C3%A3o-entre-alguns-sistemas-de-vibra%C3%A7%C3%A3o-das-carlos-trubbianelli>>. Linkedin, Acesso em: 08 março 2023.

VALADÃO, G. E. S; GALÉRY, R. e MONTENEGRO, L. C. M. Separação por tamanho. In: Valadão, G. E. S. e Araújo, A. C. A. **Introdução ao Tratamento de Minérios.** Belo Horizonte, Editora UFMG. p. 61-84, 2012.

VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao Tratamento de Minérios,** 1ª ed., Editora UFMG, Belo Horizonte - MG, 2012.

WILLS, B.A., NAPIER, M. T. J. **Mineral Processing Technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery,** 7ª ed., 444p, Elsevier Science and Technology Books, Amsterdam, Holanda, p. 186-191, 2006.

WEISS, N. L. **SME Mineral Processing Handbook.** Society of Mining Engineers, 1985