EDIS SIQUEIRA NUNES FILHO

**Influência da umidade no dimensionamento e seleção de peneiras vibratórias
em instalações de britagem**

São Paulo

2017

EDIS SIQUEIRA NUNES FILHO

**Influência da umidade no dimensionamento e seleção de peneiras vibratórias
em instalações de britagem**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

**São Paulo
2017**

EDIS SIQUEIRA NUNES FILHO

**Influência da umidade no dimensionamento e seleção de peneiras vibratórias
em instalações de britagem**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:

Engenharia Mineral

Orientador:

Prof. Dr. Homero Delboni Junior

São Paulo

2017

Catálogo-na-publicação

Nunes Filho, Edis Siqueira

Influência da umidade no dimensionamento e seleção de peneiras vibratórias em instalações de britagem / E. S. Nunes Filho -- São Paulo, 2017. 114 p.

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

1.PENEIRAS VIBRATÓRIAS (ENSAIOS; DIMENSIONAMENTO)
2.SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA 3.UMIDADE DO MINÉRIO (INFLUÊNCIA)
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida, pelo corpo e pela alma, que me permitiram escrever este trabalho, contribuindo de alguma forma com a ciência e quem sabe até ajudando a indústria mineral na melhoria de seus processos.

À minha esposa Cláudia, por todo o apoio, principalmente nos dias mais difíceis, e pelo carinho e cuidado dedicado ao nosso amado filho Theodoro.

A toda a minha família, especialmente minha mãe Nair, por seu amor infinito e por ter me proporcionado uma educação de primeiríssima qualidade.

Ao meu sogro e à minha sogra, que me acolheram como um filho e estiveram sempre dispostos a ajudar, dando um suporte extra à conclusão do trabalho.

Ao meu orientador, Professor Doutor Homero Delboni Júnior, pelos ensinamentos, ideias e grande amizade.

A toda minha equipe de trabalho na Metso, em especial a Toshihiko Ohashi, Ricardo Ogawa e Edilson Pereira, pela ajuda no dia a dia, nos experimentos e nas sugestões de melhorias no trabalho.

RESUMO

Peneiras vibratórias são equipamentos amplamente utilizados em circuitos de cominuição nas mais variadas funções, desde classificação primária, processando blocos de algumas toneladas até em um escalpe de finos para um britador, até mesmo um processo de desaguamento, no qual as telas atuam como filtros, processando polpas que contêm partículas muito finas. Sua utilização tem crescido consideravelmente nos últimos anos, pois quando as peneiras vibratórias são corretamente aplicadas, possibilitam aumentar a eficiência de uma usina a custos razoavelmente baixos. Embora as funções do peneiramento sejam de fácil entendimento, o processo de seleção e dimensionamento dos equipamentos é complexo e sujeito a erros de difícil solução. Quando o minério tem baixa umidade, caso da maioria das aplicações, os dimensionamentos feitos pelos métodos tradicionais apresentam boa correlação com os resultados obtidos nas peneiras industriais. Entretanto, quando a umidade é alta, os cálculos podem apresentar grandes desvios frente ao desempenho real ou simplesmente não funcionar. Este problema é bastante comum em regiões tropicais, como o Norte do Brasil, local com alta incidência de chuvas, onde predominam minérios alterados. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método de dimensionamento de peneira, através de ensaios em laboratório com pequena quantidade de amostras, que permite ao usuário estimar o desempenho de uma peneira industrial no processamento de minérios difíceis com melhor precisão, comparado aos métodos convencionais. As conclusões demonstram a viabilidade técnica do método proposto e seus limites de aplicação.

PALAVRAS-CHAVE: Peneira; Umidade; Ensaio; Dimensionamento.

ABSTRACT

The vibrating screens are widely used in the comminution circuits for different applications. They can be used for fines removal before a crusher or as a dewatering equipment, where the screening media act as a filter. The screen utilization has been extensively growing in the last years since its accurate operation allows plant efficiency improvements at a minor cost. Although the screening process has an easy understanding, the scale-up and sizing methods can be complex and subject to errors that are difficult to solve. When an ore has low natural moisture, representing most applications, the screen size estimates done by traditional methods normally shows proper correlation compared to industrial screens. However, when the moisture content is high, calculations may present significant deviations when compared to the real operation. This kind of problem is characteristic for tropical regions such as the North of Brazil, where weathered rocks are predominated. The objective of this work was to develop a screen sizing method which allows the user to do an industrial screen performance estimation for difficult high natural moisture ores, based on laboratory test work with reduced quantity of samples, and to provide better accuracy when compared to the results coming from traditional sizing methods. The conclusions demonstrate the technical viability of the method and its application limits.

KEYWORDS: Screen; Moisture; Testing; Sizing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONJUNTO DE PENEIRAS DE LABORATÓRIO (CORTESIA TYLER INDUSTRIAL)	15
FIGURA 2 – GRELHA FIXA EM USINA DE PROCESSAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO.....	17
FIGURA 3 – GRELHA VIBRATÓRIA M-4628 DE GRANDE PORTE (METSO MINERALS, 2005) .	18
FIGURA 4 – PENEIRA VIBRATÓRIA MODELO XH DA METSO MINERALS	19
FIGURA 5 – INDICAÇÃO DA ABERTURA DA TELA E SUA PROJEÇÃO (VERDADEIRA ABERTURA)	21
FIGURA 6 – ETAPAS DO PENEIRAMENTO – PENEIRA INCLINADA VERSUS PENEIRA BANANA ..	22
FIGURA 7 – PENEIRA ELÍPTICA COM PERFIL DO MOVIMENTO E FORÇAS ATUANTES	24
FIGURA 8 – PENEIRA HORIZONTAL LH (CORTESIA METSO).....	25
FIGURA 9 – EXEMPLOS DE TELAS EM AÇO COM DIFERENTES TIPOS DE FIXAÇÃO	27
FIGURA 10 – TELAS DE BORRACHA/POLIURETANO COM DIFERENTES ÁREAS LIVRES.....	28
FIGURA 11 – ILUSTRAÇÃO DE UMA TELA AUTOLIMPANTE	29
FIGURA 12 – EFEITO DA UMIDADE SOBRE O PENEIRAMENTO.....	35
FIGURA 13 – FATOR DE CAPACIDADE C EM FUNÇÃO DA ABERTURA	39
FIGURA 14 – FATOR DEVIDO À QUANTIDADE DE OVERSIZE M.....	40
FIGURA 15 – FATOR DEVIDO À QUANTIDADE DE UNDERSIZE K	41
FIGURA 16 – DEFASAGEM DAS ETAPAS DO PENEIRAMENTO NOS DIFERENTES DEQUES	42
FIGURA 17 – FATOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA ABERTURA DA PENEIRA.....	43
FIGURA 18 – PLANILHA DE CÁLCULO DE PENEIRAMENTO COM RESULTADO FICTÍCIO.....	48
FIGURA 19 – PENEIRA CIRCULAR INFINITA NA FÁBRICA DA METSO EM SOROCABA	51
FIGURA 20 – ETAPAS DO ENSAIO DE PENEIRAMENTO USANDO A PENEIRA INFINITA	53
FIGURA 21 – EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO – CASO A.....	59
FIGURA 22 – CAPACIDADE ESPECÍFICA VERSUS UMIDADE PARA TELA DE 16 MM.....	61
FIGURA 23 – EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO – CASO B.....	63
FIGURA 24 – CAPACIDADE ESPECÍFICA VERSUS UMIDADE PARA TELA DE 9,5 MM.....	64
FIGURA 25 – EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO – CASO C	66
FIGURA 26 – CAPACIDADE ESPECÍFICA VERSUS UMIDADE PARA TELA DE 1,0 MM.....	67
FIGURA 27 – CAPACIDADE ESPECÍFICA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS CASOS A, B E C..	68
FIGURA 28 – SUPERFÍCIE DE PENEIRAMENTO NA UMIDADE CRÍTICA DO CASO D	70
FIGURA 29 – EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO – CASO D	71
FIGURA 30 – CAPACIDADE ESPECÍFICA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS CASOS A E D	73
FIGURA 31 – EFICIÊNCIA DE PENEIRAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O CASO E	75

FIGURA 32 – CAPACIDADE ESPECÍFICA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS CASOS B E E	76
FIGURA 33 – AMOSTRA DE BAUXITA EM PILHA EM PREPARAÇÃO PARA OS ENSAIOS.....	78
FIGURA 34 – EFICIÊNCIAS DE PENEIRAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O CASO F	79
FIGURA 35 – EFICIÊNCIAS DE PENEIRAMENTO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA O CASO G.....	80
FIGURA 36 – CAPACIDADE ESPECÍFICA PARA OS CASOS F E G.....	81
FIGURA 37 – BAUXITA ADERIDA ÀS TELAS APÓS ENSAIO NA UMIDADE CRÍTICA	82
FIGURA 38 – CAPACIDADES ESPECÍFICAS PARA O CASO A CONTRA CEC ALLIS-CHALMERS	85
FIGURA 39 – CAPACIDADES ESPECÍFICAS PARA O CASO B CONTRA CEC ALLIS-CHALMERS	87
FIGURA 40 – CAPACIDADES ESPECÍFICAS PARA O CASO C CONTRA CEC ALLIS-CHALMERS	89
FIGURA 41 – CAPACIDADES ESPECÍFICAS PARA O CASO D CONTRA CEC ALLIS-CHALMERS	91
FIGURA 42 – CAPACIDADES ESPECÍFICAS PARA O CASO E CONTRA CEC ALLIS-CHALMERS	92
FIGURA 43 – CAPACIDADES ESPECÍFICAS PARA OS CASOS F E G CONTRA CEC ALLIS- CHALMERS	94
FIGURA 44 – CAPACIDADE ESPECÍFICA EM FUNÇÃO DA UMIDADE – CASO A.....	96
FIGURA 45 – PENEIRABILIDADE CASO A VERSUS PENEIRA CIRCULAR.....	98
FIGURA 46 – PENEIRABILIDADE CASO A VERSUS PENEIRA BANANA.....	100
FIGURA 47 – PENEIRABILIDADE CASO A VERSUS PENEIRA ELÍPTICA.....	102

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES PARA Q3 EM FUNÇÃO DO TAMANHO DE SEPARAÇÃO	42
TABELA 2 – VALORES PARA Q5 EM FUNÇÃO DA PORCENTAGEM DE ÁREA ABERTA	44
TABELA 3 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO – CASO A.....	57
TABELA 4 – CÁLCULO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA – CASO A	60
TABELA 5 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO – CASO B.....	62
TABELA 6 – CÁLCULO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA – CASO B	63
TABELA 7 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO – CASO C	65
TABELA 8 – CÁLCULO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA – CASO C	66
TABELA 9 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO – CASO D	69
TABELA 10 – CÁLCULO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA – CASO D	72
TABELA 11 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO – CASO E.....	74
TABELA 12 – CÁLCULO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA – CASO E	76
TABELA 13 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ALIMENTAÇÃO – CASO BAUXITA	77
TABELA 14 – CÁLCULO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA – CASO F	79
TABELA 15 – CÁLCULO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA – CASO G	80

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS.....	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 BREVE HISTÓRICO DAS PENEIRAS VIBRATÓRIAS	13
3.2 FUNDAMENTOS DO PENEIRAMENTO	13
3.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (PENEIRAS DE LABORATÓRIO)	14
3.4 GRELHAS E PENEIRAS INDUSTRIAIS	16
3.4.1 Grelhas de Barras Fixas	16
3.4.2 Grelhas Vibratórias	17
3.4.3 Peneiras de Escalpe	18
3.4.4 Peneiras de “Classificação”	19
3.4.5 Peneiras com Inclinação Variável (Perfil Banana)	21
3.4.6 Peneiras com Perfil Banana e Movimento Elíptico.....	23
3.4.7 Peneiras Horizontais.....	24
3.5 TIPOS DE TELAS	25
3.5.1 Telas com Fios de Aço	26
3.5.2 Placas Perfuradas	27
3.5.3 Telas de Borracha	27
3.5.4 Telas de Poliuretano.....	28
3.6 PRINCIPAIS CONCEITOS DE PENEIRAMENTO	30
3.6.1 Estratificação.....	30
3.6.2 Probabilidade de Separação.....	31
3.6.3 Eficiência de Peneiramento.....	32
3.6.4 Aceleração	33
3.6.5 Efeito da Umidade	33
3.7 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE PENEIRAS	35
3.7.1 Método Empírico de Dimensionamento – Allis-Chalmers.....	37
3.7.2 Determinação da Largura Mínima da Peneira	45
3.7.3 Planilha de Cálculo de Peneiramento.....	46
3.7.4 Método Físico de Dimensionamento – Peneira Circular Infinita Metso.....	49
4 MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1 PENEIRA CIRCULAR INFINITA (PCI)	50
4.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO	51
4.3 TEORIA DO PENEIRAMENTO INFINITO	54

5	RESULTADOS DE ENSAIOS E DISCUSSÕES	56
5.1	ENSAIOS COM MINÉRIOS DE FERRO TÍPICOS	57
5.1.1	<i>Caso A (Abertura de 16 mm)</i>	57
5.1.2	<i>Caso B (Abertura de 9,5 mm)</i>	61
5.1.3	<i>Caso C (Abertura de 1 mm)</i>	64
5.2	ENSAIOS COM MINÉRIOS DE FERRO ATÍPICOS	69
5.2.1	<i>Caso D (Abertura de 25 mm)</i>	69
5.2.2	<i>Caso E (Abertura de 12 mm)</i>	74
5.3	ENSAIO COM BAUXITA – CASOS F E G	77
6	COMPARAÇÕES ENTRE O MÉTODO PROPOSTO E O MÉTODO ALLIS-CHALMERS PARA DIMENSIONAMENTO DE PENEIRAS	83
6.1	RESULTADOS DA PCI CONTRA MÉTODO ALLIS-CHALMERS	83
6.1.1	<i>Comparativo Caso A</i>	83
6.1.2	<i>Comparativo Caso B</i>	86
6.1.3	<i>Comparativo Caso C</i>	88
6.1.4	<i>Comparativo Caso D</i>	90
6.1.5	<i>Comparativo Caso E</i>	92
6.1.6	<i>Comparativo Casos F e G</i>	93
7	COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DA PENEIRA INFINITA E DE PENEIRAS INDUSTRIAIS	95
7.1	RESULTADOS DA PENEIRA INFINITA CONTRA PENEIRA INDUSTRIAL	95
7.1.1	<i>Comparação da Peneira de Laboratório contra Peneira Circular</i>	97
7.1.2	<i>Comparação da Peneira de Laboratório contra Peneira Banana</i>	99
7.1.3	<i>Comparação da Peneira de Laboratório contra Peneira Elíptica</i>	101
8	CONCLUSÕES	104
9	RECOMENDAÇÕES	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1 INTRODUÇÃO

Normalmente, quando se idealiza uma usina de beneficiamento de minério, os equipamentos que vêm prontamente à memória são os britadores, os moinhos de bolas e as células de flotação. As peneiras vibratórias são, por diversas vezes, consideradas equipamentos secundários ou até mesmo auxiliares devido ao menor CAPEX, OPEX e complexidade técnica em comparação aos equipamentos mencionados. Isso explica, em parte, as razões pelas quais o peneiramento tem uma carência de estudos técnicos e de mão de obra especializada.

Apesar de muitas vezes predominar essa visão de a peneira ser equipamento secundário num projeto de beneficiamento mineral, não dar a devida importância ao peneiramento pode resultar no comprometimento da capacidade produtiva de todo o projeto.

Nota-se também que os critérios de dimensionamento e seleção de peneiras vibratórias estão apoiados na prática e no dia a dia das instalações. A seleção de peneiras muitas vezes é feita através do conhecimento de outras usinas, sendo que ajustes em campo são frequentemente observados.

Existem diferentes métodos de seleção de peneiras, porém estes geralmente são válidos para condições controladas de alimentação, na qual esta provém de rocha sã com características de fluxo livre, i.e., não tem propriedades aderentes ou pegajosas. Para minérios pegajosos, muitas vezes provenientes de rochas alteradas, a prática pode apresentar resultados completamente distintos dos obtidos nos cálculos feitos pelos métodos convencionais de dimensionamento, podendo trazer severos problemas para todo o processo.

Esses minérios aderentes têm como principais características alta umidade e alta quantidade de finos (menores que 0,15 mm). Outra propriedade que pode agravar a aderência é a alta quantidade de argilominerais combinada aos finos e umidade. Exemplos de minérios conforme descrição acima são facilmente encontrados em regiões tropicais, como, por exemplo, no Norte do Brasil. Os casos mais comuns são minério de ferro, rocha fosfática, minério de níquel, bauxita e calcário.

A dificuldade em peneirar esses minérios à umidade natural (ou via seca) resultou na escolha de processos via úmida (ou peneiras com *sprays* de lavagem) por diversas minerações. No entanto, embora esse método tenha sido utilizado durante anos, atualmente está cada vez mais difícil obter licença para o uso expressivo de água. Em alguns países já foi praticamente proibido o uso de água no peneiramento, com o intuito de reduzir o impacto ambiental.

O desastre na barragem de rejeitos da Samarco na cidade de Mariana (MG), em 2015, também está impulsionando a indústria mineral para utilização preferencial de processos via seca ou à umidade natural.

Devido a essas razões, os principais fabricantes de peneiras vibratórias há vários anos estudam as inúmeras variáveis presentes nesse equipamento, além de desenvolver tecnologias inovadoras com o objetivo de peneirar os minérios difíceis da maneira mais eficiente possível.

Alguns parâmetros das peneiras que já apresentaram resultados satisfatórios para peneirar esses minérios difíceis foram o aumento da aceleração (determinada por uma combinação de velocidade de rotação e amplitude), o desenvolvimento de telas autolimpantes e a aplicação de mecanismos vibratórios que proporcionaram movimento elíptico.

Devido à complexidade do peneiramento à umidade natural, ensaios em escala de laboratório em peneira circular foram conduzidos na fábrica da empresa Metso, sediada na cidade de Sorocaba (SP), a fim de determinar os níveis críticos de umidade para cada tipo de amostra ensaiada. Os resultados desses ensaios foram usados para dimensionar e selecionar qual tipo de peneira e qual área necessária deveriam ser aplicadas para cada caso.

Esse método de dimensionamento vem sendo usado há alguns anos e reduziu significativamente as incertezas na aplicação de peneiramento à umidade natural para minérios considerados difíceis. Em um caso extremo, os resultados dos ensaios foram fundamentais para indicar que o projeto não seria viável, devido à impossibilidade de peneirar a seco, mesmo utilizando todos os recursos disponíveis até o momento.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal estabelecer os princípios de um método confiável de dimensionamento e seleção de peneira vibratória para peneiramento à umidade natural, com base em ensaios em laboratório em peneira vibratória circular desenvolvida no laboratório da empresa Metso Brasil. Nesse sentido, foi necessário criar uma peneira de laboratório para a realização de ensaios em pequena escala e, a partir dos resultados, desenvolver um método físico de dimensionamento de peneiras com base nesses mesmos ensaios.

O método permite a utilização de amostras de minério de tamanho e quantidade reduzidos e visa determinar a capacidade específica de peneiramento para cada nível de umidade, bem como níveis críticos de umidade em função do tamanho da abertura empregada no peneiramento.

A partir de uma série de resultados experimentais, o dimensionamento de peneiras segundo o novo método foi confrontado com o dimensionamento efetuado segundo o método da Allis-Chalmers, este último derivado da VSMA – Vibrating Screen Manufacturers Association. As comparações incluíram também resultados obtidos em instalações industriais. Desta forma, foi possível avaliar a eficácia do método e os respectivos erros associados, comparativamente aos métodos tradicionais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Breve Histórico das Peneiras Vibratórias

Bilhões de toneladas de minério em seu estado natural são extraídos da terra todos os anos e processados de diversas maneiras para se tornarem úteis à humanidade. É seguro dizer que a grande maioria desses materiais passa sobre superfícies de peneiramento (Allis-Chalmers, 1953).

As chamadas peneiras vibratórias modernas foram primeiramente introduzidas durante a década de 1910. Essas máquinas simples eram compostas por chassis em aço, que permitia o encaixe de algum tipo de superfície de peneiramento e, 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 nos chassis, dando origem às primeiras peneiras vibratórias. Nos anos 1920 e começo dos 1930, o desenho desses chassis, assim como os mecanismos de vibração, apresentaram melhorias consideráveis, sendo que, na década de 1940, peneiras vibratórias passaram a ser equipamentos de grande importância nas usinas de beneficiamento (Fred Bond, 1983).

Atualmente, peneiras vibratórias são bastante utilizadas tanto em instalações de britagem para mineração como em pedreiras, para produção de britas na construção civil. Por sua natureza vibratória, as peneiras são equipamentos mecânicos constantemente exigidos e por isso mais suscetíveis à fadiga. Assim, as peneiras requerem maior cuidado tanto nas manutenções (preventiva, corretiva e preditiva) quanto na respectiva operação. A escolha correta do modelo e do tamanho de peneira é fundamental para a eficiência de todo o processo.

3.2 Fundamentos do Peneiramento

De acordo com Chaves (2009), o peneiramento consiste na separação de uma população de partículas em duas frações de tamanhos diferentes, mediante a sua apresentação a um gabarito de abertura fixa predeterminada. Cada partícula tem apenas a possibilidade de passar ou de ficar retida. Os dois produtos chamam-se

oversize, ou retido, e *undersize*, ou passante. Os gabaritos podem ser grelhas de barras paralelas, telas de malhas quadradas, telas de malhas retangulares, telas de malhas alongadas, telas de fios paralelos, chapas perfuradas ou placas fundidas.

O peneiramento abrange uma gama enorme de aplicações, modelos e tamanhos. As grelhas fixas, por exemplo, podem ter aberturas de até 800 mm, com trilhos reforçados para receber os blocos gerados durante a detonação na mina e evitar que matacões adentrem o britador primário. Já uma peneira vibratória com a função de desaguamento pode ser equipada com telas de aberturas próximas a 0,3 mm, atuando mais como um filtro para permitir a passagem de água.

Dentre os muitos tipos e modelos de peneiras existentes, cada uma delas possui atributos específicos, que variam de acordo com a etapa no processo de beneficiamento e sua aplicação. Equipamentos industriais para peneiramento podem ser subdivididos genericamente em grelhas fixas, grelhas vibratórias inclinadas, peneiras vibratórias inclinadas, peneiras vibratórias horizontais, peneiras de alta frequência, peneiras vibratórias para moinho SAG, tromeis (peneiras rotativas), entre outras.

O peneiramento é dito “a seco” quando efetuado com o material na sua umidade natural e “a úmido” ou “via úmida” quando o material é alimentado na forma de uma polpa ou recebe água adicional através de *sprays* convenientemente dispostos sobre os *decks* de peneiramento (Chaves, 2009).

O foco deste trabalho é o peneiramento sob umidade natural elevada de minérios considerados de difícil peneiramento. Historicamente, esse tipo de peneiramento tem apresentado inúmeras dificuldades nas minerações, ao mesmo tempo que é cada vez mais solicitado devido às restrições crescentes de emprego de água da mineração.

3.3 Análise Granulométrica (Peneiras de Laboratório)

As peneiras de laboratório são constituídas basicamente por uma superfície de peneiramento em geral feita de fios de aço ou bronze com aberturas quadradas, resultando em precisão elevada de peneiramento.

O conjunto de peneiras de laboratório é montado em uma moldura cilíndrica, de forma que as peneiras ficam umas sobre as outras. As telas de menores aberturas são posicionadas na parte inferior e as maiores são colocadas por cima, até que o conjunto esteja completo. Uma tampa e um fundo são usados para completar o conjunto.

A amostra é colocada na parte superior, e todo o conjunto é submetido à vibração. Após determinado período, que normalmente varia de 10 a 15 minutos, toda a amostra estará dividida em frações granulométricas, sendo que cada fração contém material que passou por uma malha superior, porém não passou pela malha inferior. A Figura 1 apresenta um conjunto de peneiras utilizadas em laboratório.

Figura 1 – Conjunto de peneiras de laboratório (cortesia Tyler Industrial)

Partículas minerais em geral apresentam formato irregular, sendo, portanto difícil definir rigorosamente o respectivo tamanho. Para esferas perfeitas, o tamanho está relacionado ao diâmetro. No entanto, para cubos, o tamanho da partícula é discutível, podendo ser o tamanho de uma aresta, sua diagonal mais longa, ou até mesmo o diâmetro da esfera em que o volume é o mesmo do cubo. Com as partículas em formato irregular, é impossível definir com exatidão seu tamanho (Gaudin, 1939).

Partindo das três dimensões – comprimento, largura e espessura –, diferentes técnicas podem medir uma ou outra ou até mesmo uma combinação delas. Por

exemplo, quando uma partícula é medida sobre um trilho (barras paralelas), seu maior tamanho geralmente é o considerado. No peneiramento de laboratório com fios de aço e malha quadrada, a segunda maior dimensão da partícula é a mais importante, porém a menor dimensão, e até certo ponto também a maior, devem ser consideradas (Gaudin, 1939).

Existem diferentes escalas e padrões para peneiras de laboratório. As mais conhecidas e utilizadas são a escala americana (U.S. Sieve Series), as britânicas (British Standard Series) e Tyler Series. Uma referência bastante conhecida é a malha de 200 Tyler. Esse padrão surgiu com uma peneira de 200 fios por polegada linear, ou 200 aberturas por polegada linear, na qual a abertura é um furo quadrado de 74 micrômetros, ou 0,074 mm (Gaudin, 1939).

Muitas especificações de produtos em mineração são feitas através da porcentagem passante em determinado tamanho, sendo que essa verificação é feita com base nas peneiras de laboratório com tamanhos padronizados. Peneiras de laboratório são também utilizadas para determinar a eficiência do peneiramento industrial e analisar o desempenho de equipamentos, como britadores e moinhos.

3.4 Grelhas e Peneiras Industriais

Atualmente existem no mercado uma variedade grande de modelos e tamanhos de grelhas e peneiras. A seguir estão listados alguns desses modelos e também um breve descritivo de sua função dentro do processo de beneficiamento.

3.4.1 Grelhas de Barras Fixas

As grelhas fixas são constituídas de barras ou trilhos equidistantes apoiados numa estrutura de suporte. São muito comuns os trilhos paralelos e horizontais, usados como proteção para evitar que grandes blocos gerados durante a detonação na mina eventualmente adentrem o britador primário, o que poderia causar engaiolamentos e perda de produção.

O tamanho entre os trilhos é normalmente entre 0,6 m e 0,9 m, dependendo do tamanho e do tipo de britador primário. Em casos em que o ROM (Run-of-Mine) contém muitos blocos, a presença de grelhas fixas resulta em paradas mais

frequentes, justamente para a retirada dos blocos que ficam retidos junto aos trilhos, o que também gera perda de produção. A Figura 2 apresenta uma imagem de uma usina industrial de britagem com a grelha fixa instalada antes do britador primário.

Figura 2 – Grelha fixa em usina de processamento de minério de ferro

3.4.2 Grelhas Vibratórias

As grelhas vibratórias são equipamentos extremamente robustos, pois recebem o minério ROM, que podem ter matacões da ordem de algumas toneladas. O comprimento desses equipamentos é encurtado para aumentar a resistência à flexão e evitar danos prematuros (Chaves, 2009).

Observa-se que embora sejam equipamentos robustos, grelhas vibratórias não são projetadas para receber alimentação direta via caminhão ou pá carregadora. Elas devem ser alimentadas de forma controlada, sem que os blocos caiam de grandes alturas ou assumam grandes velocidades. Isto é obtido preferencialmente com uma alimentação feita através de um alimentador de sapatas ou alimentador vibratório com fluxo controlado.

O objetivo da instalação de uma grelha vibratória em um circuito é diferente da instalação de uma peneira vibratória: não se objetiva uma separação eficiente entre finos e grossos, mas tão somente desviar uma quantidade razoável de finos do

britador primário. O excesso de finos alimentados ao britador causam abrasão, desgaste e redução de capacidade. Assim, a eficiência não é uma consideração primordial, sendo que grelhas vibratórias apresentam valores de eficiência entre 60% e 70%. A Figura 3 apresenta a imagem de uma grelha vibratória na fase final do processo de fabricação.

Figura 3 – Grelha vibratória M-4628 de grande porte (Metso Minerals, 2005)

3.4.3 Peneiras de Escalpe

Peneiras vibratórias de escalpe têm função similar às grelhas vibratórias, ou seja, a remoção de finos para a etapa posterior do processo. Peneiras de escalpe também não precisam alcançar eficiências muito elevadas. Valores típicos de eficiência para esse grupo estão entre 70% e 80%.

A estrutura de peneiras de escalpe é bastante reforçada, pois elas recebem produto da britagem primária com blocos de 0,3 m ou até maiores. Normalmente as peneiras de escalpe são equipadas com telas de borracha com elevada resistência ao impacto e abrasão, de forma a aumentar a vida útil, assim como reduzir o nível de ruído.

Nota-se que as exigências para um sistema de britagem em uma mineração são significativamente diferentes das de um sistema de britagem em uma pedreira. Isto ocorre porque as capacidades e o tamanho dos equipamentos em uma mineração

de grande porte geralmente são muito maiores comparados aos das pedreiras. Além disso, o regime de produção em mineração normalmente é de 24 horas diárias, enquanto em uma pedreira trabalha-se em um ou dois turnos, portanto de 8 a 16 horas diárias. Por essas razões, uma peneira de escalpe em uma pedreira tem uma estrutura com menos reforços e, conseqüentemente, menos massa comparada a uma peneira de escalpe aplicada em uma mineração, ainda que as capacidades específicas e as eficiências estipuladas sejam idênticas.

A título de comparação, uma peneira de escalpe com 1,52 m (5') de largura e 4,27 m (14') de comprimento para uma mineração pode ter uma massa total de 4,7 t, enquanto uma peneira de escalpe em uma pedreira, de mesmas dimensões, pode ter massa total de 3,9 t, ou seja, 17% menor. A Figura 4 apresenta a imagem de uma peneira vibratória inclinada.

Figura 4 – Peneira vibratória modelo XH da Metso Minerals

3.4.4 Peneiras de “Classificação”

Embora o termo não seja correto, as assim denominadas pela indústria como peneiras vibratórias de classificação são muito similares às de escalpe, porém apresentam estruturas menos reforçadas. Isso se deve ao fato de o tamanho máximo de alimentação de peneiras de “classificação” ser significativamente menor, da ordem de 150 mm. Em geral, são divididas em três grupos: peneiras de classificação

grosseira, com tamanhos de partículas que variam entre 50 mm e 200 mm, de classificação média, entre 5 mm e 50 mm, e de classificação fina, para partículas menores que 5 mm.

As peneiras inclinadas operam normalmente com ângulos que variam entre 15° e 35°, transportando material a uma velocidade de 18 m a 36 m/min. O movimento da partícula é circular, num plano vertical. A vibração é responsável pelo alçamento das partículas, produzindo a estratificação. O deslocamento das partículas se dá por meio do impulso transmitido pelo movimento vibratório e pela inclinação (Gallery, 2007).

O movimento circular tem algumas características importantes, pois nesse regime as partículas recebem força em todos os sentidos, implicando menor probabilidade de ficarem presas na tela de peneiramento. Outra característica do movimento circular é de gerar eficiência alta na classificação das partículas, desde que a peneira esteja bem dimensionada. Em virtude da aplicação de forças em todas as direções, inclusive para trás, proporciona uma menor velocidade de transporte e, conseqüentemente, menor capacidade comparada aos outros tipos de movimentos, como o inclinado linear da peneira banana.

O peneiramento em superfícies inclinadas é realizado normalmente com aberturas de tela um pouco maiores em relação ao tamanho de produto estipulado pelo processo. Isto se deve ao fato de que a projeção da abertura no plano horizontal é menor do que a própria abertura, dificultando a passagem das partículas. A Figura 5 apresenta uma ilustração desse aspecto.

Esse ponto é importante quando ocorre a definição da abertura da tela da peneira industrial, pois o tamanho estipulado é definido nas peneiras de laboratório, com fios de aço e no plano horizontal. No caso de usar telas mais espessas, como de borracha, a projeção da abertura é ainda menor. Com isso, a malha escolhida que proporcionará tamanho de corte similar ao obtido em laboratório deverá ser maior, geralmente na faixa de 15%.

Figura 5 – Indicação da abertura da tela e sua projeção (verdadeira abertura)

3.4.5 Peneiras com Inclinação Variável (Perfil Banana)

As peneiras com perfil banana recebem essa denominação por apresentarem ao longo do seu comprimento diferentes inclinações. A peneira é subdividida em três partes, sendo que a primeira, responsável por receber a alimentação, tem a maior inclinação, geralmente de 25°. A alta inclinação permite que o fluxo de material alcance maior velocidade e, por consequência, rápida estratificação.

A segunda parte da peneira tem uma inclinação similar à das peneiras inclinadas convencionais, com 20°, cujo intuito é reduzir a velocidade do material e proporcionar um tempo adequado para o processo de separação. O último terço da peneira tem a menor inclinação, 15°, proporcionando uma redução ainda maior da velocidade e garantindo, assim, mais chances para peneirar o tamanho crítico, também chamado de *near size*.

A inclinação dos deques para o peneiramento a seco é diferente do processo com *sprays* de lavagem. Em via úmida a peneira do tipo banana também começa com 25°, contudo a inclinação da segunda parte é menor e a descarga tende a 0°. Caso a peneira com lavagem terminasse em 15° de inclinação, maior quantidade de água seria carregada para o *oversize*, arrastando os finos e reduzindo a eficiência do peneiramento.

As inclinações acima descritas são típicas de equipamentos fabricados pela Metso. Equipamentos produzidos por outros fornecedores podem apresentar valores diferentes.

A Figura 6 mostra um comparativo entre as etapas de peneiramento para uma peneira inclinada convencional e uma peneira com perfil banana. Percebe-se que a estratificação e a passagem dos finos ocorrem de forma mais acentuada logo no início da peneira banana, enquanto na peneira inclinada convencional esse período é bem maior. Já o comprimento para classificar o tamanho *near size* na peneira banana é bastante superior ao da peneira convencional.

Figura 6 – Etapas do peneiramento – peneira inclinada *versus* peneira banana

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.

As peneiras banana são encontradas mais frequentemente em minerações, tanto para função de escalpe quanto para separação por tamanhos propriamente dita, conhecida como “classificação” final de produtos. Isto se deve principalmente à maior capacidade relativa das peneiras tipo banana e também por suas características

construtivas mais robustas, muito importante para o regime de trabalho de 24 horas diárias, bem como processar minérios de alta densidade como os de ferro.

A título de comparação, uma peneira inclinada convencional com 2,4 m (8') de largura e 6,1 m (20') de comprimento pode ter uma massa total de aproximadamente 10 t, enquanto uma peneira banana, com a mesma largura e comprimento, pode ter massa total de 15 t, ou seja, 50% menor.

3.4.6 Peneiras com Perfil Banana e Movimento Elíptico

As peneiras vibratórias de movimento circular proporcionam um lançamento de partícula com um ângulo de 70° a 80° em relação à superfície de peneiramento, enquanto as peneiras de movimento linear proporcionam um ângulo de 40° a 55° . Devido ao lançamento mais acentuado do movimento circular, a inclinação da peneira deve ter no mínimo 12° . Para movimento linear, as peneiras podem inclusive trabalhar com ângulos negativos de até 7° . A grande vantagem do movimento circular sobre o linear é a baixa tendência ao entupimento, conforme demonstrou Pritchard (1984).

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 deques, resultando em maior flexibilidade de operação.

A peneira elíptica permite controlar o tempo de peneiramento do material sobre o deque, 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°), o que aumenta o tempo de residência do material sobre o deque.

Em períodos de alimentação com minério seco, é possível fazer o processo inverso, ou seja, diminuir o ângulo de lançamento a 30° e com isso aumentar a velocidade de lançamento e, por consequência, a capacidade. A Figura 7 apresenta ilustrações da peneira elíptica, com a indicação das forças atuantes nas partículas e os respectivos ângulos de lançamento.

Figura 7 – Peneira elíptica com perfil do movimento e forças atuantes

O ajuste no ângulo de lançamento é obtido através da sincronização eletrônica dos excitadores da peneira feita por *encoder* dos motores. O autossincronismo é obtido com o ângulo de 45° . Essa descrição refere-se a peneiras elípticas fabricadas pela Metso. O sistema de vibração de peneiras fabricadas por outros fornecedores é geralmente diferente.

3.4.7 Peneiras Horizontais

Peneiras vibratórias horizontais apresentam como principal característica o deque horizontal ou em ângulos próximos ao horizontal, tanto positivo como negativo. Na sua grande maioria, possui movimento linear gerado por mecanismo de caixa ou par de vibradores girando em sentidos opostos. Por contar somente com impulso do movimento linear, a velocidade de transporte do material sobre a tela é relativamente baixa, em geral entre 12 m e 18 m/min, o que reduz a capacidade de tais equipamentos.

As peneiras horizontais são normalmente aplicadas onde haja restrições de altura, em classificação fina, abaixo de 5 mm, e também para processos de lavagem e desaguamento. Esses equipamentos apresentam como principal característica

construtiva estrutura reforçada. A Figura 8 apresenta uma fotografia de uma peneira horizontal tradicional LH, fabricada pela Metso.

Figura 8 – Peneira horizontal LH (cortesia Metso)

Alguns modelos de peneiras horizontais podem ser equipados também com telas na parte traseira. Isto traz o benefício de um aumento significativo na área para passagem da água, principalmente em aplicações com polpas muito diluídas. Na linha Metso, essas peneiras são chamadas de LH-DW (Low Head – Dewatering).

Outro tipo de aplicação para peneira horizontal é a que recebe a descarga de moinhos tipo SAG, chamadas genericamente de peneiras SAG. Esse tipo específico de peneira é distinto das convencionais, pois precisa de uma estrutura super-reforçada, na medida em que o fluxo de polpa na descarga do SAG não está alinhado à peneira e o volume de polpa é tipicamente bastante alto.

As peneiras SAG devem ser horizontais, pois são os modelos com menor altura do mercado. Essa característica permite que o moinho SAG seja também instalado em uma altura mais baixa, comparado ao caso de instalar uma peneira inclinada. Vale destacar que o prédio onde fica instalado o moinho SAG normalmente é o setor da usina que apresenta o maior custo para implantação. Assim, quanto menor sua altura, menor é o custo de investimento de todo o prédio.

3.5 Tipos de Telas

Uma variável muito importante na definição da peneira é o tipo de tela a ser empregado. 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.

Atualmente existe uma grande variedade de tipos de telas disponíveis no mercado para as mais variadas aplicações. As telas sintéticas, tanto de borracha como de poliuretano, foram as que mais se diversificaram, com importantes desenvolvimentos nos últimos anos, resultando, principalmente, em maior durabilidade. Outras tecnologias desenvolvidas são as telas que utilizam uma mescla de materiais, por exemplo as autolimpantes. Esses modelos combinam o baixo custo e maior área livre obtida com aço e a maior durabilidade e flexibilidade do poliuretano, trazendo os benefícios de cada um deles às aplicações mais difíceis.

3.5.1 Telas com Fios de Aço

As malhas em aço, embora seja a tecnologia mais antiga, ainda são as mais utilizadas no mercado. Estão disponíveis em uma gama muito variada de tamanhos, tanto em formato quadrado como retangular. Em geral são as telas que possuem maior área livre e, por isso, são as que proporcionam maior capacidade por área unitária de peneiramento. As telas em aço também são as de menor preço de aquisição, caso seja considerado apenas seu custo inicial.

As telas em aço tipicamente são as que se desgastam mais rapidamente. Por esse motivo, os fabricantes de telas têm desenvolvido ligas metálicas e tratamentos térmicos especiais, no intuito de aumentar a vida útil dos fios. A Figura 9 apresenta fotografias de alguns modelos de telas de aço e respectivos sistemas de fixação disponíveis no mercado.

Figura 9 – Exemplos de telas em aço com diferentes tipos de fixação

3.5.2 Placas Perfuradas

Em geral as placas perfuradas têm características similares às telas com fios de aço. Porém em placas perfuradas ocorre uma redução na área livre e um aumento considerável no custo inicial. As mesmas placas perfuradas são geralmente usadas em aplicações primárias, devido a sua grande resistência ao impacto e desgaste.

As placas perfuradas também são preferíveis às barras paralelas (trilhos) em grelhas vibratórias, quando o minério tem fragmentos predominantemente lamelares. Os trilhos, que são o equipamento-padrão nas grelhas, permitem que grandes lajes passem por entre os vãos, podendo causar danos severos aos equipamentos posteriores, como, por exemplo, rasgos em transportadores de correia. Placas perfuradas evitam a passagem dessas lajes e assim aumentam a disponibilidade dessas operações.

3.5.3 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 e têm vida útil consideravelmente maior, quando comparadas a telas convencionais, feitas em aço. No entanto, as telas de borracha podem apresentar uma redução significativa na área livre e, por consequência, requerer áreas maiores de peneiramento para obter uma mesma eficiência na separação, se comparadas às de aço.

Por sua vez, as telas de borracha podem apresentar diferentes áreas livres para uma mesma abertura, mediante a variação da espessura de borracha entre os furos. A Figura 10 apresenta três tipos de malhas de borracha com áreas livres bastante diferentes entre si.

Figura 10 – Telas de borracha/poliuretano com diferentes áreas livres

As primeiras telas mostradas na Figura 10 são do tipo padrão em borracha e em poliuretano. Apresentam áreas livres médias e vida útil intermediária. A área livre de uma tela-padrão varia entre 35% e 40%, dependendo da abertura. Para comparação, a área livre em uma tela em aço convencional geralmente é 50% ou maior.

A segunda tela mostrada é um modelo que privilegia a vida útil em detrimento da área livre. É comumente utilizada para aplicações mais severas, com minérios muito abrasivos, e sua área livre pode ser reduzida para até 30%. O terceiro modelo segue o caminho oposto, privilegiando a maior área livre (maior capacidade) em detrimento da vida útil.

3.5.4 Telas de Poliuretano

Semelhante às telas de borracha, o custo inicial de telas de poliuretano é mais elevado quando comparado ao aço convencional. No entanto, a gama de produtos não é tão diversificada quanto as superfícies em aço ou borracha, devido à maior limitação de uso de telas de poliuretano para partículas muito grosseiras. As telas em poliuretano são bastante utilizadas tanto em peneiramento a seco como úmido na faixa de aberturas média a fina, porém é nesse último processo que mostra uma grande vantagem sobre as telas de borracha pela ação lubrificante em contato com a

água, bem como a possibilidade de fabricar telas de aberturas muito finas, o que não é possível nas telas de borracha. Assim, as telas de poliuretano são as mais recomendadas para peneiramento com lavagem em materiais finos, inclusive desaguamento, em que a demanda seja por um bom controle de produto. De maneira geral, no Brasil não são usadas telas em poliuretano em classificação a seco de aberturas médias ou finas, embora em países como o Chile seja comum tal emprego.

As telas autolimpantes combinam as propriedades do poliuretano, de boa resistência ao desgaste, com a maior área livre proporcionada pelo aço. Essas telas são dotadas de um núcleo interno flexível que aumenta a vibração dos filamentos individuais. Isso inibe o acúmulo de material na superfície da peneira, evitando entupimento e aumentando a eficiência do peneiramento. O núcleo interno flexível é recoberto com uma camada resistente à abrasão, que aumenta a vida útil da tela. A Figura 11 apresenta uma ilustração de tela autolimpante.

Figura 11 – Ilustração de uma tela autolimpante

Uma característica importante das telas autolimpantes é que os fios em aço não devem estar interlaçados a fim de não apresentar cantos vivos, como nas telas convencionais. Os cantos são os primeiros locais onde o minério começa a grudar e por isso devem ser evitados. O formato típico é em harpa.

A tela descrita é somente um dos tipos disponíveis de autolimpantes. Atualmente há no mercado muitos outros tipos de autolimpantes de aço, borracha (e.g. Stepflex) e poliuretano (e.g. zig-zag).

3.6 Principais Conceitos de Peneiramento

Um número considerável de modelos que preveem o desempenho das peneiras vibratórias foi desenvolvido ao longo dos anos. Os resultados desses modelos podem variar dependendo das premissas assumidas, porém todos se baseiam em dois grandes conceitos fundamentais sobre peneiramento, que são a estratificação e a probabilidade de separação, descritos a seguir. (Mellor, 1990).

3.6.1 Estratificação

É o processo de segregação de partículas que resulta do movimento vibratório. As partículas maiores, devido à maior quantidade de movimento, são lançadas a alturas maiores, posicionando-se em camadas superiores, enquanto as partículas menores são lançadas a alturas menores e também escoam por espaços vazios, sendo assim conduzidas a camadas inferiores do deque. O resultado é, portanto, uma segregação em virtude do tamanho, o que favorece a separação por tamanho sobre a tela da peneira. Os fatores inter-relacionados que afetam a estratificação são:

- 1) Percurso do material: é uma função das propriedades do minério, como granulometria e densidade, especificação do tipo de tela, espessura da camada e inclinação da peneira.
- 2) Características de funcionamento da peneira: amplitude, rotação, tipo de movimento e frequência.
- 3) Umidade superficial das partículas: o alto teor de umidade dificulta a estratificação.

3.6.2 Probabilidade de Separação

A probabilidade de separação de uma dada partícula é função da relação entre seu tamanho e a abertura da tela. Quanto menor for o tamanho da partícula em relação à abertura da tela, mais facilmente ela passará (Metso Minerals, 2005).

As partículas com tamanho 50% superior à abertura da tela têm importância reduzida para o resultado do peneiramento, pois seguem facilmente ao *oversize*. A quantidade relativa dessas partículas influencia principalmente o desgaste e a energia consumida pela peneira.

As partículas de tamanho na faixa entre a abertura e 50% superior a esta também ficam retidas, porém afetam com maior intensidade o desempenho do peneiramento. Essas partículas precisam fazer várias tentativas para passar pela abertura e, por isso, aumentam o risco de ficarem presas à tela.

As partículas na faixa de tamanho entre a abertura e 50% inferior a esta são denominadas de tamanho crítico ou *near size*, pois também precisam de várias tentativas para passar pela abertura. No entanto, como as partículas têm formato irregular, dependendo da maneira como se apresentam à abertura do peneiramento, podem simplesmente ficar presas ou não passarem, mesmo que em outras dimensões as mesmas passassem. Este tamanho é determinante para a capacidade e a eficiência do peneiramento.

Partículas com tamanho inferior a 50% da abertura não apresentam muita influência no peneiramento, uma vez que atravessam facilmente as malhas.

Partículas com tamanho muito menor do que 50% da abertura não deveriam influenciar no peneiramento, porém acabam diminuindo a eficiência em várias aplicações. Quando o minério está bem seco ou próximo à umidade zero, essas partículas tendem a passar direto pela abertura. No entanto, quando o minério está úmido, há uma tendência de as partículas superfinas se unirem ou grudarem nas mais grosseiras, ocasionando ineficiências no peneiramento. É quando se faz necessário o peneiramento em via úmida, no qual as partículas são lavadas e os finos são forçados a passar por entre as telas.

3.6.3 Eficiência de Peneiramento

Um dos aspectos técnicos mais relevantes do peneiramento é a respectiva eficiência. Uma peneira operando com eficiência inadequada poderá causar sérios problemas à instalação, entre os quais:

- 1) Má operação da britagem subsequente. Por exemplo, no caso de uma peneira de escalpe operar com baixa eficiência, é provável que muitos finos sigam para o britador, diminuindo respectivamente a produção e aumentando o desgaste dos revestimentos.
- 2) Sobrecarga do circuito fechado de britagem. A baixa eficiência proporciona maior carga circulante, à medida que o material fino que deveria passar recircula no mesmo circuito.
- 3) Produtos fora de especificação. Produtos finais de beneficiamento de pedreiras podem, por exemplo, estar fora de especificação, na medida em que frações retidas contenham quantidade relativamente alta de finos. Por exemplo, no caso de uma peneira de classificação final em uma pedreira, em que o retido está contaminado com muitos finos além dos limites de tolerância.

A eficiência de um peneiramento pode ser definida pela seguinte equação, considerando-se o material passante (E_p):

$$E_p = \frac{\% \text{ da alimentação que realmente passa ou passante real}}{\% \text{ da alimentação menor que a abertura da tela}}$$

A eficiência também pode ser definida, embora de maneira menos usual, considerando-se o material retido (E_r):

$$E_r = \frac{\% \text{ da alimentação maior que a abertura da tela}}{\% \text{ da alimentação que realmente fica retida}}$$

3.6.4 *Aceleração*

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

A frequência de vibração varia normalmente entre 660 rpm e 3400 rpm (Foreman, 1991), dependendo do tamanho da abertura. A maioria dos peneiramentos via seca tem frequência na faixa de 1000 +/- 200 rpm. Frequências mais rápidas são em geral utilizadas em pequenas aberturas, como as peneiras de alta frequência, que são empregadas exclusivamente em aplicação com partículas muito finas.

Uma expressão muito comum para peneiras industriais é relativa à força de lançamento ou força G (F_g), definida como o pico da aceleração da peneira. A aceleração é um múltiplo da aceleração gravitacional (A_g), frequência vibratória (F_v) e amplitude (A_m), em um número sem dimensão, conforme a equação:

$$F_g = \frac{A_m \times \omega^2}{A_g} = \frac{A_m \times 2\pi(F_v)^2}{A_g}$$

A amplitude e a frequência são geralmente escolhidas para proporcionar um número de 3 a 6 vezes a aceleração gravitacional, com um valor ótimo entre 3,5 e 4 vezes a aceleração gravitacional, nas peneiras vibratórias inclinadas, e entre 4,5 e 5 G nas peneiras de movimento linear (Mellor, 1990; Yell e Du Toit, 2005). Na prática, a amplitude varia entre 20 mm até valores menores que 1 mm. A maioria das aplicações em peneiras via seca utiliza amplitude na faixa 8 +/- 3 mm.

3.6.5 *Efeito da Umidade*

Peneiramento de minérios secos ou com excesso de água (baixa porcentagem de sólidos) é relativamente fácil, contudo baixas umidades, como 2% ou 3%, já podem causar graves problemas no processo. Em particular, o peneiramento de materiais como argila, fertilizantes e alguns produtos químicos tem baixíssima tolerância à umidade. Em geral, quanto menor a abertura de peneiramento, menor é a umidade deletéria à eficiência de classificação.

O desempenho do peneiramento conduzido sob umidade natural pode ser afetado por duas principais razões. A primeira é o fenômeno de cegamento, causado pelas partículas úmidas e muito finas que aderem progressivamente aos fios do peneiramento, em especial nos cantos, até que no limite tapam 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.

Determinados dispositivos contra o cegamento das telas foram desenvolvidos por alguns fabricantes, como o chamado *ball-deck*. Pequenas esferas ficam soltas logo abaixo das telas e, quando a peneira vibra, essas esferas saltam e batem nas telas, desprendendo as partículas que estavam aderidas.

Quando ocorre cegamento de telas com umidades relativamente mais baixas, uma alternativa é usar aquecedores elétricos nas telas das peneiras. Contudo, esse método pode dobrar o preço de aquisição da peneira. O uso de aquecedores também não tem se mostrado eficaz para o peneiramento de minérios difíceis e se encontra em desuso.

A técnica mais utilizada até recentemente para minérios mais problemáticos era o peneiramento em via úmida (com *sprays* de lavagem). O fluxo de água pressurizada faz com que as partículas finas, que ficaram aderidas à tela ou às partículas mais grosseiras, se soltem e sejam encaminhadas ao *undersize*.

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 no minério. É possível notar que até 2% e acima de 50% de umidade a peneirabilidade pode ser considerada fácil. Na faixa compreendida entre esses dois valores o peneiramento é considerado entre relativamente difícil e impossível, esta última com umidades entre 15% e 25%. A zona de peneiramento impossível é denominada de umidade crítica.

Figura 12 – Efeito da umidade sobre o peneiramento

Devido às restrições crescentes no uso da água, as mineradoras estão buscando novas soluções para praticar peneiramento em umidade natural, mesmo com minérios mais difíceis. Assim, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas, de forma a minimizar os efeitos do cegamento das telas e a aderência entre partículas que ocorrem na zona crítica.

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.

3.7 Métodos de Dimensionamento e Seleção de Peneiras

A seleção de peneiras é uma tarefa bastante árdua, tendo em vista a diversidade de equipamentos disponíveis e a grande variedade de parâmetros que precisam ser avaliados. É bastante comum a afirmação de que “a escolha da peneira é mais uma arte do que uma ciência” (Weiss, 1985).

As informações essenciais a serem fornecidas para um dimensionamento adequado da peneira são: as propriedades físicas do material a ser processado, o fluxograma do processo, a operação de peneiramento envolvida, as limitações físicas da instalação industrial e as preferências do operador (Weiss, 1985).

O fabricante de peneira ou seus técnicos devem estar preparados para fornecer dados específicos dos tipos de peneiras mais indicados de acordo com as especificidades do processo. A partir dessas indicações preliminares, a variedade de modelos é reduzida, o que facilita o processo de seleção. Segue-se o dimensionamento do tipo de peneira selecionada, com base em algum método racional de dimensionamento.

Existem vários métodos de dimensionamento de peneiras, que podem ser subdivididos em quatro grandes categorias: os empíricos, os semiempíricos, os numéricos e os físicos. Este último se utiliza de algum instrumento ou aparato concebido em laboratório que permita a realização de ensaios com pequena quantidade de amostra e assim estimar o desempenho da peneira através de um processo de *scale-up*.

Os métodos semiempíricos e numéricos não são muito utilizados na indústria mineral. Os métodos semiempíricos, por exemplo, em geral assumem que a peneira tem apenas um deque e sua geometria é simples, o que evidentemente não é válido para a maioria das peneiras industriais. Além disso, são necessários dados de uma peneira existente para a construção dos modelos, o que torna o uso desse método muito limitado.

Os métodos numéricos – que são basicamente técnicas numéricas de modelagem de sistemas particulados analítico-computacionais –, como o Discrete Element Method (DEM) e o Finite Element Modelling (FEM), por sua vez, mostram-se bastante promissores, porém suas técnicas ainda não estão plenamente consolidadas com respeito à modelagem do peneiramento.

Enquanto isso, os métodos físicos se apresentam como importantes meios para a obtenção de estimativas razoáveis para o desempenho das peneiras. Métodos físicos de modelagem são amplamente aplicados em vários campos da indústria para simular um processo em larga escala através de ensaios em pequena escala.

Neste trabalho não serão abordados os métodos semiempíricos e numéricos. Além de serem utilizados com menor frequência na indústria, não há, em nenhum deles, estudos da influência da umidade no peneiramento. Uma excelente revisão dos principais métodos de dimensionamento de peneiras foi realizada por Hilden (2007).

Para efeito do presente trabalho, o método de dimensionamento de peneiras analisado foi o considerado mais tradicional, qual seja, aquele desenvolvido pela VSMA (Vibrating Screens Manufacturer Association). Tal método vem sendo aprimorado, e outros parâmetros foram incorporados aos modelos antigos, de forma a torná-los mais precisos. Atualmente o método mais utilizado é denominado Allis-Chalmers.

3.7.1 Método Empírico de Dimensionamento – Allis-Chalmers

Existem vários métodos empíricos desenvolvidos por fabricantes de peneiras, sendo que todos eles têm como princípio a avaliação dos seguintes parâmetros:

- 1) Cálculo da área necessária para passagem de todo o *undersize*.
- 2) Cálculo da largura da peneira para que a altura do leito na descarga do *oversize* seja, no máximo, quatro vezes a abertura da tela.

Como boa prática, é recomendado que a razão do comprimento *versus* a largura da peneira seja, no mínimo, de 2:1. Uma peneira de 4' de largura, por exemplo, deverá ter, no mínimo, 8' de comprimento.

A fórmula para o dimensionamento de peneiras determina a área necessária (m²) de peneiramento para remover o material passante na alimentação. Portanto, antes de ser descarregado na fração retida final (Allis-Chalmers Theory). Uma vez calculada a área necessária, é possível especificar o comprimento e a largura que proporcionarão uma área igual ou superior à área requerida pelo cálculo.

De acordo com o método Allis-Chalmers, a área de peneiramento é dada pela seguinte fórmula:

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

Em que:

- Ø A é a área necessária da superfície da peneira em m²;
- Ø T é a alimentação do deque da peneira em m³/h;

- Ø P é um fator de projeto que depende do nível de incerteza em relação ao minério a ser peneirado, podendo variar entre 1 e 1,4;
- Ø C é a capacidade básica para separação especificada, em m^3 por hora de alimentação por m^2 de área da peneira;
- Ø M é o fator dependente da porcentagem de material retido;
- Ø K é o fator relativo à porcentagem de material da alimentação inferior à metade do tamanho da operação especificada;
- Ø Q_n é o fator de correção, resultante do produto entre os fatores Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 e Q_6 .

Para desenvolvimento do método Allis-Chalmers, algumas condições-padrão foram adotadas:

- 1) 25% do material de alimentação fica retido na malha teste;
- 2) 40% do material de alimentação é passante na metade da abertura da malha teste;
- 3) eficiência de peneiramento entre 90% e 95%;
- 4) minério alimentado à peneira com densidade aparente de $1,6 \text{ t/m}^3$;
- 5) aberturas quadradas com 50% de área livre;
- 6) minério com característica de fluxo livre e relativamente cúbico.

O fator “C” é considerado essencial, pois resultou de ensaios realizados no centro de tecnologia da então Allis-Chalmers com peneiras de diferentes tamanhos e amostras com características bastante controladas.

O fator “C” é de natureza empírica, sendo representado no gráfico da Figura 13. Observa-se que para uma malha de 25,4 mm (1”), o fator de capacidade é de aproximadamente $33 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ ou $53 \text{ t/h}/\text{m}^2$, considerando uma densidade aparente de $1,6 \text{ t/m}^3$ do material a ser peneirado.

Figura 13 – Fator de capacidade C em função da abertura

Conforme indicado no gráfico, o fator C segue uma tendência crescente e linear no intervalo entre 30 mm e 200 mm. No entanto, quando se atinge menores aberturas, como o intervalo entre 5 mm e 30 mm, nota-se que curva decresce de forma mais acentuada. Essa inflexão indica que, para aberturas menores que 30 mm, o peneiramento fica significativamente mais difícil.

Para o dimensionamento de uma peneira industrial deve-se sempre considerar as variações das condições de operação em relação às condições-padrão do método. Uma forma conveniente de comparar as condições da operação estipulada ante as condições-padrão é calcular o chamado fator “C real”, que é o fator C multiplicado por todos os fatores de correção.

O fator de correção “M” considera a diferença entre a porcentagem de retido na aplicação específica em relação à condição-padrão. Isso deriva do fato de as partículas relativamente grandes aumentarem a quantidade de vazios, deixando mais fácil a passagem do material fino para estratificação.

A Figura 14 apresenta a curva do fator M. Pode-se observar que o ponto em que a porcentagem de *oversize* é 25%, o valor de “M” é igual a 1, pois foram essas as condições-padrão do ensaio Allis-Chalmers. Caso a alimentação tenha 60% de

material retido, o valor de “M” aumenta para 1,3, o que significa 23% de redução na área necessária de peneiramento.

Figura 14 – Fator devido à quantidade de *oversize* M

O fator de correção “K” considera a diferença entre a porcentagem de fração passante na aplicação estudada em relação à condição-padrão. A partir de 25%, quanto maior a quantidade de finos na alimentação, mais fácil será o peneiramento, conforme indica o gráfico da Figura 14.

A Figura 15 apresenta a curva do fator K, com destaque para o valor unitário, que corresponde a 40% de *undersize* na alimentação, valor este padrão do método Allis-Chalmers. Caso a alimentação contenha 60% de material passante, o valor “K” aumenta para 1,4. Pela fórmula da área de peneiramento, fator “K” igual a 1,4 implica redução de 28,5% em relação à área de peneiramento em condições-padrão do método Allis-Chalmers.

Figura 15 – Fator devido à quantidade de *undersize* K

Há uma limitação do uso desse fator de finos (K), pois o método Allis-Chalmers considera que os finos não apresentam propriedades aderentes. Contudo, sabe-se que, para determinados minérios, mesmo em umidades baixas os finos podem aderir às telas ou desenvolver cimentação, diminuindo assim a eficiência do peneiramento.

Mudanças na densidade aparente também afetam o dimensionamento da peneira, pois o cálculo é basicamente volumétrico. Quando a densidade aparente de um minério é alta, o volume por tonelada de minério é menor, resultando assim em menor área requerida para o peneiramento para a mesma vazão mássica.

Os fatores "Q" incluem vários aspectos do peneiramento, dentre os quais: posição relativa do deque (Q1), formato de partículas (Q2), se o peneiramento é "via úmida" (Q3), porcentagem de umidade no peneiramento dito "via seca" (Q4), porcentagem de área aberta da tela ou tipo de tela (Q5) e tipo de peneira (Q6).

O fator Q1 é aplicado para as peneiras de dois ou mais deque. No primeiro deque adota-se o valor 1; para o segundo deque, 0,9; e o terceiro deque, 0,8. Isto ocorre porque no segundo e terceiro deque o material de alimentação não "enxerga" toda a área do deque, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Defasagem das etapas do peneiramento nos diferentes deques

Para o fator Q2, referente ao formato de partículas, são recomendados o valor 1 quando são consideradas partículas cúbicas e 0,9 quando são lamelares. As partículas lamelares têm maior dificuldade de passagem pelas aberturas devido a um de seus lados ter maior dimensão e por isso precisar de maior área para passar.

Quando água é adicionada ao peneiramento, a lavagem proporcionada tende a ajudar as partículas finas a passar pelas aberturas e, assim, aumentam a capacidade de peneiramento. Isto é particularmente importante para tamanhos menores que 25,4 mm. Para tamanhos maiores que 25,4 mm, o efeito da água de lavagem é mínimo. O fator Q3 está relacionado a peneiramento “a úmido”, e a Tabela 1 apresenta os respectivos valores em virtude do tamanho de separação.

Tabela 1 – Valores para Q3 em função do tamanho de separação

Separação (mm)	1 - 6	6 - 12	12 - 25	26 - 40	41 - 50	51 - 75	+ 75
Q3	1,4	1,3	1,25	1,2	1,1	1,15	1

O fator Q4 refere-se à porcentagem de umidade no peneiramento “a seco” e sua influência está atrelada ao fato de que se o material apresenta alguma umidade, isto reduzirá a habilidade de estratificação e, conseqüentemente, maior área de peneiramento será necessária.

Para umidades menores que 3%, o fator Q4 assume valor unitário. Para umidades entre 3% e 5% adota-se o valor de 0,85, e entre 6% e 8%, adota-se o valor de 0,7. Para valores de umidade superiores a 8% não é recomendado utilizar o método

da Allis-Chalmers de dimensionamento ou qualquer outro método que esteja fundamentado em minérios com características de fluxo livre.

A definição acima descrita para o valor de Q4 era muito simplista e não relacionava a influência da umidade em função da malha de peneiramento. Contudo, é conhecido o fato de que quanto menor a abertura da peneira, maior tende a ser a influência da umidade no desempenho do peneiramento. Assim, recentemente foi desenvolvido pela Metso um ábaco para quantificar o fator Q4 em função de diferentes aberturas de peneiramento e umidades, conforme apresentado na Figura 17.

Como exemplo, o mesmo ábaco da Figura 17 indica valor do parâmetro Q4 de 0,4 para uma umidade de 5% e abertura de 5 mm, enquanto o mesmo fator Q4 deve ser aumentado para 0,8 ao se considerar a mesma umidade de 5%, porém com abertura da tela de 10 mm.

Figura 17 – Fator de umidade em função da abertura da peneira

Existem outras formas de estimar o fator Q4, e os valores são geralmente restritos aos fabricantes de peneiras. Isto torna o dimensionamento de peneiras sob a influência da umidade um trabalho bastante pessoal e restrito, muitas vezes impreciso ou equívoco.

A literatura revisada não indicou nenhum método explícito para o dimensionamento de peneiras para alimentação com umidade superior a 10%. Nesses casos, a recomendação é consultar os fabricantes.

Umidades acima de 10% colocam os minérios em uma zona de alto risco para o peneiramento devido à forte tendência a cimentação e aderência das partículas às telas. Sob a ótica de fabricante e fornecedor de peneiras industriais, para esse tipo específico de aplicação recomenda-se sempre a execução de ensaios de peneiramento em laboratório, os quais serão detalhados no Capítulo 4 desta dissertação, “Materiais e métodos”.

O fator Q5 está relacionado ao tipo de tela selecionado e a sua porcentagem de área livre. A recomendação mais atual para a utilização deste fator é apresentada na Tabela 2, a qual indica o valor unitário para 50% de área aberta, portanto condição-padrão do método Allis-Chalmers. Para porcentagens de área aberta menores que 50%, o valor de Q5 é reduzido.

Tabela 2 – Valores para Q5 em função da porcentagem de área aberta

% aberta	10	15	25	30	40	50	60	70
Q5	0,78	0,83	0,9	0,93	0,97	1	1,03	1,05

Nas aplicações mais convencionais, tem-se como regra geral:

- Ø telas de aço quadrada: $Q5 = 1$ e retangular = 1,05;
- Ø placa em aço perfurada quadrada: $Q5 = 0,75$ e retangular = 0,8;
- Ø telas em poliuretano/borracha quadrada: $Q5 = 0,8$ e retangular = 0,9;
- Ø borracha flexível: abertura quadrada: $Q5 = 0,9$ e retangular = 1.

Para os tipos de telas desenvolvidos mais recentemente, como as telas autolimpantes, são aplicados outros fatores, dependendo da aplicação. No entanto, cada fabricante pode determinar seus próprios fatores, e este tema normalmente é tratado de forma confidencial.

O fator Q6 refere-se ao tipo de peneira aplicada. Para peneiras inclinadas convencionais de movimento circular adota-se Q6 igual a 1. Para peneiras de movimento linear, como as peneiras banana, sugere-se Q6 igual a 1,1.

Existe uma variedade muito grande de modelos de peneiras, e cada fabricante pode adotar valores de Q6 bastante diferentes. O fator Q6 é estimado de forma empírica e por isso o tema geralmente também é tratado de maneira confidencial por fabricantes. Para peneiras elípticas, por exemplo, devido ao seu tipo de movimento diferenciado, adota-se um fator Q6 específico.

Embora o método Allis-Chalmers seja aplicado há décadas pela indústria mineral com resultados bastante satisfatórios, existem ainda inúmeras aplicações nas quais esse mesmo método apresenta sérias limitações. O método de cálculo não leva em conta vários fatores que podem afetar consideravelmente a eficiência do peneiramento, dentre os quais:

- Ø efeito de variações na excentricidade;
- Ø efeitos nas variações da aceleração;
- Ø não tem precisão para classificação muito fina (abaixo de 1 mm);
- Ø não funciona para alimentações contendo alta quantidade de superfinos, como é o caso das peneiras SAG;
- Ø não determina a influência de umidade nos peneiramentos difíceis (com umidade acima de 10%).

Para as aplicações nas quais o método tem severas restrições, é necessário executar ensaios de laboratório, de forma a determinar as capacidades específicas de peneiramento.

3.7.2 Determinação da Largura Mínima da Peneira

Após o cálculo da área necessária de peneiramento é preciso avaliar a altura de camada de material na descarga da peneira. Como regra geral, a altura de camada na descarga não deve ser maior que quatro vezes o tamanho da abertura. Se a altura de camada ficar acima de quatro vezes o tamanho da abertura, não haverá

estratificação adequada do material sobre a tela, o que, por sua vez, reduzirá a eficiência do peneiramento.

O cálculo da espessura de camada é dado pela fórmula:

$$D = \frac{100 \times T}{6 \times S \times (W - 0,15)}$$

em que:

- Ø D – espessura de camada em mm;
- Ø T – capacidade em m³/h;
- Ø S – velocidade de transporte em m/min;
- Ø W – largura nominal da peneira em metros.

Para peneiras de múltiplos deques, a verificação da área requerida e também da altura de camada em todos os deques pode ser bastante complexa. Normalmente o último deque é o que requer maior atenção, pois possui a menor abertura e, conseqüentemente, o fator de capacidade (C) mais crítico.

Em geral, quando o último deque cumpre as exigências da aplicação, a peneira toda deverá cumprir sua função. No entanto, há exceções como nos casos em que a peneira recebe minério muito grosseiro ou quando o produto principal é o retido nos deques e não pode estar muito contaminado.

3.7.3 Planilha de Cálculo de Peneiramento

Os métodos antigos de cálculos de capacidade de peneiramento desenvolvidos antes da década de 1970 não levavam em consideração inúmeros fatores que afetavam a eficiência do equipamento. As fórmulas foram concebidas com intuito de manter os cálculos fáceis e que pudessem ser executados de forma manual. Atualmente, o uso generalizado de computadores proporcionou a possibilidade de cálculos mais complexos em períodos muito mais curtos. Isto permitiu também a inclusão de fatores mais sutis ao processo, que aumentam significativamente a precisão das conclusões.

O aumento da precisão reduziu o sub e o superdimensionamento de peneiras. Subdimensionar uma peneira pode causar a queda da produção de toda uma usina, enquanto superdimensionar uma peneira pode representar um investimento de capital desnecessário.

Com essa finalidade, o fabricante de peneiras Metso desenvolveu uma planilha de cálculo na qual um grande número de variáveis e fatores presentes no método Allis-Chalmers pudessem ser inseridos.

O programa requer alguns dados de entrada, como: distribuição granulométrica da alimentação, densidade aparente, formato de partícula, umidade, abertura da malha, tipo de tela e tipo de peneira. Ele automaticamente calcula os parâmetros requeridos para determinar a área e a largura necessárias da peneira para a aplicação especificada.

A Figura 18 apresenta a planilha de cálculo desenvolvida pela Metso. Alguns dos índices mais importantes para a seleção apropriada da peneira são apresentados, tais como: fator de capacidade “C” real ou fator “C” corrigido, eficiências estimadas para todos os deques, altura de camada na alimentação e na descarga, entre outros índices.

O programa também identifica quando a aplicação é de risco e alerta o usuário, por exemplo, para os casos com umidades acima de 8%. Neste último cenário, o programa emite um sinal de erro e não calcula nenhum parâmetro do peneiramento.

Figura 18 – Planilha de cálculo de peneiramento com resultado fictício

metso

Customer: Customer A
 Project: Project X
 Screen TAG:
 Date: XX/XX/2016 Done by: Edis Nunes

Page 1/2

Screen Model: Ellipti Flo 25°-15°
 Width: 2,4 m Length: 6,1 m Decks: 3

Feed		Desired cut (P99)		Calculation			
mm	% Passing	1st deck:			1st deck	2nd deck	3rd deck
200	100,0	2nd deck:	40,0 mm	% Passing cut:	52,7	54,1	60,0
100	87,0	3rd deck:	19,0 mm	% Passing half cut:	30,0	27,2	31,7
50	64,0	Total feed:	12,0 mm	C factor:	65,7	45,6	34,1
20	30,0	Num. of screens:	1000 mtph	Oversize Factor:	1,19	1,18	1,12
10	15,0	Feed per screen:	1	Half Factor:	0,79	0,74	0,83
2	4,0	Bulk density:	1000 mtph	Density:	1,37	1,37	1,37
		Moisture:	2,2 t/m ³	Shape:	0,90	0,90	0,90
		Shape:	3,0 %	Wet:	1,00	1,00	1,00
			Slabby	Moisture:	1,00	1,00	1,00

Media Configuration				Calculation			
	1st deck	2nd deck	3rd deck		1st deck	2nd deck	3rd deck
Type:	LS RU STD	Wire Mesh	Wire Mesh	Open area:	0,80	0,70	0,66
Slot ratio:	Square	Slot 1:3	Round	Slot:	1,00	1,20	0,80
Open area:	40 %	35 %	33 %	Banana:	1,33	1,34	1,37
Dry or wet:	Dry	Dry	Dry	Media:	1,30	1,00	1,00
				Deck:	1,00	0,90	0,80
				Factor ton/h/m ² :	104,9	49,6	22,7
				Required area (m ²):	9,5	10,6	12,57
				Screen Load:	65	73	86
				Undersize Efficiency:	95,0	95,0	94,0
				Feed speed (m/s):	1,20	1,20	1,20
				Feed bed (mm):	44	22	12
				Feed bed ratio:	1,1	1,1	1,0
				Discharge speed (m/s):	0,50	0,50	0,50
				Discharge bed (mm):	53	24	11
				Discharge bed ratio:	1,3	1,3	0,9

Expected Balance Mass Per Screen

1st Deck: 1000 (in), 495 (out)
 2nd Deck: 505 (in), 268 (out)
 3rd Deck: 227 (in), 168 (out)
 100 (out)

3.7.4 Método Físico de Dimensionamento – Peneira Circular Infinita Metso

Uma parcela considerável dos trabalhos de investigação do processo de peneiramento se utiliza de algum exemplar em escala de laboratório ou piloto para prever o comportamento de peneiras industriais. Porém nem sempre os resultados desses ensaios em menor escala podem ser correlacionados com os resultados em escala industrial. Normalmente os ensaios em peneiras de laboratório podem ser usados para obter tendências do comportamento em peneiras industriais, mas não permitem fazer previsões qualitativas.

Por isso, o método físico desenvolvido neste trabalho teve como objetivo tornar a peneira empregada nos ensaios de laboratório a mais fiel possível do processo de separação que ocorre em uma peneira industrial. Foi criado um processo de peneiramento contínuo, sendo que grande parte das variáveis geométricas e condições de operação foi semelhante às utilizadas industrialmente.

As principais medidas obtidas a partir do ensaio criado incluem: eficiência de peneiramento, capacidade específica e altura de camada. O dispositivo também permite conhecer o nível de aderência da amostra de minério às telas e o efeito da cimentação entre partículas que pode ocorrer durante o processo.

As potenciais aplicações do método incluem a seleção de peneiras para novas instalações, seleção de melhores tipos de telas para determinada aplicação, otimização de operações existentes, entre outros.

A descrição da metodologia completa do método físico desenvolvido é apresentada no Capítulo 4 desta dissertação. Os resultados dos ensaios com os vários tipos de minérios e as discussões são apresentadas no Capítulo 5.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A seleção de peneiras vibratórias por métodos empíricos é um processo relativamente simples e de fácil aplicação, porém está sujeito a grandes desvios. É prática comum no processo de seleção adotar informações de desempenho contidas nos manuais dos fabricantes de peneiras. Contudo esse método pode, muitas vezes, subestimar ou superestimar o tamanho do equipamento realmente necessário.

As fórmulas teóricas provenientes de métodos empíricos aliadas à experiência prática são comumente utilizadas na escolha das dimensões do equipamento. Essas fórmulas estão apoiadas na sólida experiência acumulada ao longo dos anos e valem para a maioria das aplicações. Todavia, existem determinadas aplicações mais severas, nas quais as fórmulas tradicionais de cálculo de área são muito simplistas. Esse cenário é típico para peneiramento em que o minério possui elevada umidade natural. Nesses casos, os métodos físicos são mais seguros, pois são fundamentados na realização de ensaios em laboratório.

4.1 Peneira Circular Infinita (PCI)

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).

Esse dispositivo é formado basicamente de três elementos: na parte superior da estrutura estão localizados dois mecanismos vibratórios que, quando acionados, geram um movimento vibratório linear. Na parte central está localizada a peneira propriamente dita, que tem um formato de rosca e permite a circulação interna do minério. Na parte inferior se localiza a balança, responsável pela medição em tempo real da massa de *undersize* durante a realização dos ensaios.

Desta forma, o aparato permite a simulação de um peneiramento sem fim. Tal efeito é obtido mediante a recirculação do minério alimentado, uma vez que a fração retida na tela da peneira não tem a possibilidade de sair do equipamento. Algumas fotografias da PCI desenvolvida pela Metso e instalada nos laboratórios da empresa em Sorocaba (SP) são apresentadas na Figura 19.

Figura 19 – Peneira Circular Infinita na fábrica da Metso em Sorocaba

As principais características da PCI da Metso são:

- a) raio interno de 600 mm;
- b) raio externo de 1000 mm;
- c) movimento linear;
- d) amplitude ajustável entre 3 mm e 6 mm;
- e) aceleração ajustável, geralmente de 4G até 7G;
- f) possibilidade de aplicar diferentes tipos de telas.

4.2 Procedimento de Ensaio

A primeira etapa do ensaio em laboratório com a PCI é definir qual tipo de malha e o tamanho da abertura que será utilizada. Podem ser realizados ensaios com telas em aço, borracha ou qualquer outro tipo de material, dos mais variados tamanhos.

Uma pequena amostra representativa da alimentação de aproximadamente 2 kg é secada em estufa e submetida ao ensaio de peneiramento convencional (nas telas de laboratório-padrão) para primeiro conhecer sua distribuição granulométrica completa e assim determinar a quantidade de material passante na malha principal do ensaio. As etapas seguintes são enumeradas a seguir:

- 1) A PCI é ajustada para a amplitude e velocidade estipuladas.
- 2) É importante que a amostra de minério seja previamente homogeneizada. Como são necessários aproximadamente 50 kg de material, uma betoneira é usada para tal finalidade.
- 3) Após a homogeneização, é feita a determinação da densidade aparente pesando-se o minério contido em um recipiente de volume calibrado.
- 4) Em seguida, toda a amostra é colocada sobre a superfície de peneiramento de forma bem cuidadosa, preenchendo uniformemente os espaços sobre o deque. Nessa etapa, a PCI fica desligada, de forma que, durante a disposição da amostra, as partículas finas menores que a abertura não passem pelas telas.
- 5) Abaixo da PCI está instalada a balança para medir continuamente a quantidade de minério que é reportado ao *undersize*. A massa do *undersize versus* o tempo de peneiramento é obtida através de um *software* que armazena os dados a cada segundo do ensaio.
- 6) A PCI então é ligada e, durante todo o ensaio, a quantidade de material que se reporta ao *undersize* é medida e gravada. Assim é possível calcular a eficiência de peneiramento ao longo de todo o ensaio, uma vez que a quantidade de *undersize* contida na amostra foi previamente determinada.
- 7) O *software* permite a geração de um gráfico da eficiência do peneiramento em função do tempo do ensaio.

- 8) Por último, calcula-se o fator de capacidade específica de peneiramento, em $t/h/m^2$ de minério alimentado, de acordo com a fórmula descrita no item 4.3, “Teoria do Peneiramento Infinito”, a seguir.

A Figura 20 apresenta um diagrama esquemático das etapas principais do ensaio de peneiramento com a PCI. Pode-se observar que no início a altura de camada é relativamente alta, enquanto não há material passante pelas telas. Imediatamente após o início do ensaio, os finos começam a passar, reduzindo a altura de camada. Ao final do processo, a altura de camada já está bem menor e a pilha de *undersize*, bastante alta.

Figura 20 – Etapas do ensaio de peneiramento usando a peneira infinita

Após o primeiro ensaio, toda a amostra é recolhida para um novo ciclo de peneiramento. Determinado volume de água é adicionado à amostra para que sua umidade aumente em 1% ou 2%. A amostra é novamente homogeneizada em betoneira e segue de volta para a PCI. Registram-se as massas do *undersize* e alturas de camada e calculam-se as novas eficiências e novas capacidades específicas de peneiramento para a umidade definida.

O procedimento é repetido algumas vezes até que as propriedades de aderência ou a cimentação entre partículas comecem a ser percebidas. Quando um desses fenômenos ocorre, os finos presentes na alimentação demoram muito tempo

para se reportar ao *undersize* ou simplesmente não passam. Assim, a umidade do ensaio é considerada a crítica para esse minério.

Depois de encontrar a umidade crítica, é prática comum realizar mais dois ensaios, sendo um com maior aceleração na PCI e outro com maior umidade. Esses ensaios geralmente apresentam um melhor desempenho no peneiramento, invertendo a curva de peneirabilidade. Após essa etapa, o ensaio é encerrado.

4.3 Teoria do Peneiramento Infinito

A capacidade de peneiramento (C_p) de uma peneira vibratória, medida em m^3/h , pode ser obtida pela multiplicação da velocidade de transporte do material (T_s), em m/s , pela área de peneiramento (A_p), em m^2 . Por sua vez, a área de peneiramento é uma função da altura de camada sobre o deque (B_d) multiplicada pela largura da peneira (W_t), ambos medidos em metros.

Para converter C_p de m^3/s para t/h , deve-se multiplicá-lo pela densidade aparente (A_d) em t/m^3 e ainda pelo fator de unidade 3600 para converter horas em segundos. Assim, a C_p pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$A_p = B_d \times W_t$$

$$C_p = T_s \times A_p \times A_d \times 3600$$

$$C_p = T_s \times B_d \times W_t \times A_d \times 3600$$

O comprimento da peneira (SL) é uma função da velocidade de transporte (T_s) em m/s multiplicada pelo tempo de residência do material sobre a peneira (t) em segundos, conforme a seguinte fórmula:

$$SL = T_s \times t$$

A capacidade específica de peneiramento (C_e) pode ser então obtida pela divisão da capacidade C_p pela área de peneiramento A_p :

$$C_e = \frac{\text{Capacidade } (C_p)}{\text{Área de peneiramento } (A_p)} = \frac{B_d \times W_t \times T_s \times A_d \times 3600}{W_t \times T_s \times t} = \frac{B_d \times A_d \times 3600}{t}$$

Deve-se notar, pela equação simplificada acima, que o fator de capacidade específica C_e da peneira é função apenas da altura de camada (B_d) e do tempo de residência (t) do material sobre a superfície.

O ensaio do peneiramento na PCI consiste em registrar a quantidade de material passante pela peneira a cada segundo e medir a altura de camada remanescente, conforme ilustrado na Figura 20. Observa-se que a altura de camada diminui à medida que os finos da alimentação vão se reportando ao *undersize*.

A metodologia de ensaio descrita acima pode variar, dependendo da aplicação e das características do minério. O mais usual é ensaiar primeiramente o minério sob umidade natural, conforme recebida no laboratório. Por isso, é importante que a amostra venha sempre bem acondicionada para que suas propriedades físicas não se alterem durante o transporte.

Faz-se então o ensaio conforme descrito no item 4.2, sendo registradas as medições de quantidade de *undersize* e altura de camada por segundo. Com os dados do *undersize* é possível calcular a eficiência do peneiramento para cada segundo de ensaio.

O último cálculo a ser executado é o da capacidade específica de peneiramento (C_e) ou peneirabilidade. A peneirabilidade é calculada considerando a altura de camada (B_d) remanescente na PCI e o tempo de ensaio para atingir uma eficiência de 90%. Outras peneirabilidades também podem ser calculadas considerando diferentes valores de eficiências, como 95% ou 80%, por exemplo. Convencionou-se adotar 90% por ser a eficiência mais comum solicitada na indústria mineral.

5 RESULTADOS DE ENSAIOS E DISCUSSÕES

Os ensaios de peneiramento à umidade natural já são realizados há mais de dez anos nos laboratórios da Metso, porém a demanda por seus resultados vem aumentando de maneira considerável nos últimos anos, fortemente influenciada pelas restrições cada dia maiores do consumo de água nas minerações.

Já existe uma base de dados bastante significativa desses ensaios, sendo que a grande maioria foi realizada com minérios de ferro brasileiros, das mais diversas regiões do país. O volume de ensaios é grande, pois a peneira infinita foi desenvolvida e instalada primeiramente no Brasil, onde predominam instalações de britagem e peneiramento de minério de ferro. Embora em menor escala, também já foram realizados alguns outros ensaios de peneiramento com diferentes tipos de minérios, como bauxita, calcário e carvão.

Para efeito do presente trabalho foram selecionados grupos de ensaios contidos no banco de dados da Metso, de forma a incluir diferentes tipos de minérios. Assim, os resultados apresentados neste capítulo foram organizados em três diferentes grupos. O primeiro foi composto por três amostras distintas de minérios de ferro chamados típicos e denominados Casos A, B e C. Esse grupo foi submetido a ensaios de peneiramento para três aberturas diferentes de tela, sendo 16 mm no Caso A, 9,5 mm no Caso B, e 1 mm no Caso C.

O segundo grupo foi composto por duas amostras distintas de minérios de ferro considerados atípicos, denominados Casos D e E. Esse grupo foi submetido a ensaios de peneiramento para duas aberturas diferentes, sendo 25 mm no Caso D e 12 mm no Caso E.

O último grupo foi composto de apenas uma amostra de bauxita, que foi ensaiada em duas aberturas distintas: 6,3 mm e 8,0 mm. A abertura de 6,3 mm foi denominada Caso F, enquanto a de 8,0 mm, Caso G.

5.1 Ensaios com Minérios de Ferro Típicos

Usinas brasileiras de beneficiamento de minério de ferro não enfrentavam no passado muitos problemas com peneiramento, visto que podiam usar *sprays* de lavagem para facilitar o processo de peneiramento, principalmente quando eram processados minérios difíceis. Com o passar dos anos e o aumento das restrições no consumo de água, a demanda por peneiramento à umidade natural cresceu rapidamente no Brasil.

Para agravar ainda mais essa situação, atualmente são necessárias classificações em tamanhos cada vez menores, muitos inclusive menores que 10 mm. Isso ocorre porque os minérios de alto teor estão cada vez mais escassos e há necessidade de separar e concentrar minérios de baixo teor. Alguns dos métodos mais comuns de concentração são através de jigagem, separação magnética e flotação, sendo que esses métodos exigem classificar as respectivas alimentações em diversas frações de granulometrias finas, de forma a aumentar a liberação dos minerais de interesse.

Nas seções a seguir são apresentados alguns resultados de ensaios de peneiramento com diferentes tipos de minérios de ferro. São exemplos bastante variados, desde peneiramento utilizando grandes aberturas, como 25 mm, até aberturas de 1 mm, estas consideradas pequenas para peneiramento convencional.

5.1.1 Caso A (Abertura de 16 mm)

O primeiro grupo de ensaios aqui apresentado foi realizado com uma amostra composta predominantemente de hematita friável, oriunda de jazida localizada no Norte do Brasil. O tipo de tela usado foi aço com 16 mm de abertura. A distribuição granulométrica do minério utilizado no ensaio é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição granulométrica da alimentação – Caso A

Tamanho (mm)	% passante
50	100
31	96
25	95
19	93
13	88

4,75	78
1,19	49

Uma alíquota representativa de 50 kg da amostra foi separada para secagem ao sol enquanto uma alíquota de 2 kg foi selecionada para secagem em estufa e medição da distribuição granulométrica completa.

Após cerca de cinco horas de exposição ao sol, verificou-se que a amostra de 50 kg estava praticamente seca e apta para que fosse iniciado o ensaio. Uma pequena quantidade de aproximadamente 0,5 kg foi retirada da amostra original para determinação da umidade inicial do ensaio, que indicou 2%. A amostra de 50 kg foi então colocada na betoneira para homogeneização e depois cuidadosamente assentada sobre o deque da peneira infinita para o início do ensaio.

A peneira foi ligada e operou por um período de aproximadamente um minuto, até que todo o minério fino passasse pela tela de 16 mm. Durante o ensaio, a quantidade de minério passante foi continuamente pesada e gravada para análise posterior. Ao final do primeiro ensaio, toda a amostra de 50 kg foi recolhida, tanto o passante quanto o retido remanescente no deque, para realização de novos ensaios.

No segundo ensaio a amostra foi novamente colocada na betoneira para acréscimo de água e homogeneização. A água foi acrescida até atingir 6% de umidade, e um novo ciclo de peneiramento foi conduzido. Esse mesmo procedimento foi repetido para umidades de 8%, 9%, 10% e 11%, até que a umidade crítica fosse encontrada.

A partir dos dados gravados de massa de *undersize* foi possível calcular a eficiência do peneiramento para cada segundo, em cada ensaio. A Figura 21 apresenta os resultados da eficiência do peneiramento em função do tempo para os diferentes conteúdos de umidade ensaiados.

Figura 21 – Eficiência de peneiramento em função do tempo – Caso A

Observa-se na Figura 21 que o tempo para alcançar eficiências de peneiramento de 90% foram bastantes curtos até o ensaio com umidade de 8%, indicando que o processo se encontra na faixa convencionalmente chamada de peneirabilidade fácil. Para umidades de 2% e 6%, o peneiramento atingiu eficiências superiores a 90% em até 10 segundos.

No ensaio com 9% de umidade o tempo para alcançar uma eficiência de 90% subiu para 24 segundos, mostrando uma redução significativa na peneirabilidade para uma diferença de apenas 1% na umidade. Para umidade de 10%, o tempo para atingir 90% de eficiência alcançou seu valor máximo, 28 segundos.

A partir daí mais um ensaio foi conduzido para corroborar o atingimento da umidade crítica. Um último ensaio foi realizado com umidade de 11%, no qual foi observada uma redução no tempo de peneiramento para atingir 90% de eficiência para 23 segundos. Esse ensaio demonstrou uma inversão na curva de peneirabilidade, confirmando que a umidade crítica realmente havia sido superada. A Tabela 4 apresenta os resultados do fator de capacidade específica, em t/h/m², para cada valor de umidade ensaiado.

Tabela 4 – Cálculo da capacidade específica – Caso A

Descrição do teste	Altura de camada	Peso da amostra	Densidade Aparente	Tempo para atingir 90 % de eficiência	Fator de Capacidade
	(m)	(kg)	(t/m ³)	(s)	t/h/m ²
Teste 1: Umidade 2%, tela de aço de 16X16 mm, amplitude de 5mm e rotação de 950 rpm (5G)	0,043	50,00	2,34	4,3	83,72
Teste 2: Umidade 6%, tela de aço de 16X16 mm, amplitude de 5mm e rotação de 950 rpm (5G)	0,047	52,09	2,22	5,0	75,00
Teste 3: Umidade 8%, tela de aço de 16X16 mm, amplitude de 5mm e rotação de 950 rpm (5G)	0,045	53,19	2,38	10,0	38,30
Teste 4: Umidade 9%, tela de aço de 16X16 mm, amplitude de 5mm e rotação de 950 rpm (5G)	0,040	53,77	2,70	24,0	16,13
Teste 5: Umidade 10%, tela de aço de 16X16 mm, amplitude de 5mm e rotação de 950 rpm (5G)	0,038	54,35	2,88	28,0	13,97
Teste 6: Umidade 11%, tela de aço de 16X16 mm, amplitude de 5mm e rotação de 950 rpm (5G)	0,037	54,94	2,96	23,0	17,20

O ensaio destacado em amarelo, referente à umidade crítica, indicou que foram necessários 28 segundos para atingir uma eficiência de 90% e uma altura de camada de 0,038 metro. Com esses dados foi possível calcular a capacidade específica nessa umidade, conforme a seguinte equação:

$$Ce = \frac{Bd \times Ad \times 3600}{t} = \frac{0,038 \times 2,88 \times 3600}{28} = 13,97 \text{ t/h/m}^2$$

Esse mesmo cálculo foi realizado para todas as umidades ensaiadas a fim de construir o gráfico de peneirabilidade (ou capacidade específica) em função da umidade.

O gráfico da Figura 22 mostra 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%.

Figura 22 – Capacidade específica *versus* umidade para tela de 16 mm

A partir de 11% de umidade, a peneirabilidade voltou a aumentar, indicando que o minério iniciou sua transição do estado pastoso, em que o peneiramento é considerado impossível, para o estado de lama grossa. Não foram realizados ensaios acima de 11%, pois notou-se que o minério já havia ultrapassado seu estado de saturação.

5.1.2 Caso B (Abertura de 9,5 mm)

O segundo grupo de ensaios aqui apresentado foi realizado com uma amostra composta predominantemente por itabirito semicompacto, proveniente do sul da

região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. O tipo de tela usado também foi em aço, porém com 9,5 mm de abertura.

A distribuição granulométrica do minério ensaiado é apresentada na Tabela 5. Notou-se que a granulometria de alimentação era mais grossa do que a verificada no Caso A. Assim, enquanto a amostra de hematita friável continha 49% passantes em 1,19 mm, a amostra de minério semicompacto do Caso B apresentou apenas 25%, neste caso característico de um minério de ferro semicompacto.

Tabela 5 – Distribuição granulométrica da alimentação – Caso B

Tamanho (mm)	% passante
38	100
31	100
25	97
19	81
13	64
4,75	39
1,19	25

Uma amostra de 50 kg de itabirito semicompacto foi ensaiada, variando-se a umidade entre 0% e 9%, seguindo procedimento-padrão, conforme descrito na seção anterior deste texto. Foi observado que apenas quando a umidade era próxima a zero o ensaio atingiu eficiência de 90% em menos de 10 segundos. Em todos os outros ensaios, realizados com umidades acima de 5%, o tempo para atingir 90% de eficiência foi maior. Os maiores tempos de peneiramento foram encontrados para umidades de 6% e 7%, estabelecendo-se assim a faixa de umidade crítica.

A Tabela 6 apresenta os resultados de peneirabilidade em t/h/m², em função das umidades ensaiadas. Observa-se que os valores são significativamente inferiores aos obtidos nos ensaios do Caso A, com telas de 16 mm.

A título de exemplo, para umidade de 5%, a peneirabilidade na tela de 16 mm foi estimada pelo gráfico da Figura 22 em 80 t/h/m² (Caso A), enquanto para a tela de 9,5 mm, a peneirabilidade foi calculada, para a mesma umidade de 9%, em 11,5 t/h/m² (Caso B).

Figura 23 – Eficiência de peneiramento em função do tempo – Caso B

Tabela 6 – Cálculo da capacidade específica – Caso B

Descrição do teste	Altura de camada (m)	Peso da amostra (kg)	Densidade Aparente (t/m ³)	Tempo para atingir 90 % de eficiência (s)	Fator de capacidade t/h/m ²
Teste 1: Umidade de 0%, tela de aço de 9,5x9,5mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,045	50,00	2,22	7,0	51,43
Teste 2: Umidade de 5%, tela de aço de 9,5x9,5mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,051	52,50	2,05	33,0	11,45
Teste 3: Umidade de 6%, tela de aço de 9,5x9,5mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,048	53,20	2,23	267,0	1,43
Teste 4: Umidade de 7%, tela de aço de 9,5x9,5mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,047	53,85	2,31	274,0	1,42
Teste 5: Umidade de 8%, tela de aço de 9,5x9,5mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,044	54,35	2,48	159,0	2,46
Teste 6: Umidade de 9%, tela de aço de 9,5x9,5mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,045	55,00	2,49	121,0	3,31

O ensaio com minério de ferro semicompacto em 9,5 mm mostrou que a faixa considerada de peneirabilidade fácil é até 4% de umidade, uma vez que a partir de 4% os valores de capacidades específicas foram menores do que 20 t/h/m², valor este considerado de peneirabilidade média. A faixa de umidade crítica foi atingida na faixa de 6% a 7%.

Figura 24 – Capacidade específica versus umidade para tela de 9,5 mm

Um ponto importante observado foi a baixíssima peneirabilidade em umidades maiores que 6%. Não ocorreu o efeito da cimentação entre partículas à medida que, embora muito lentamente, os finos passavam pela tela. Embora os Casos A e B correspondam a minérios diferentes, nota-se uma tendência clara na redução da capacidade específica para peneiramento em malhas mais finas, assim como diminuição da umidade crítica também para malhas mais finas.

5.1.3 Caso C (Abertura de 1 mm)

O terceiro grupo de ensaios aqui apresentado foi realizado com uma amostra *blend* de minério de ferro composta por itabirito e hematita friáveis, oriundos do semiárido brasileiro, no Nordeste. O tipo de tela usado foi em aço com 1 mm de abertura.

Como a incidência de chuvas na região é muito baixa, é possível peneirar em malhas bastante finas como em nenhum outro local do país. O tamanho de 1 mm foi a menor abertura utilizada em todos os ensaios de peneiramento à umidade natural já realizados no centro de ensaios da Metso.

Nas minas de ferro dessa região tem-se avaliado métodos de concentração com separadores magnéticos a seco e também com aerosseparadores. Para um bom uso desses equipamentos, são requeridas alimentações com granulometrias mais finas, sendo comum ter de classificar partículas menores do que 5 mm.

A umidade natural da amostra por ocasião do recebimento foi de 2,4%, valor considerado baixo para os padrões brasileiros. A distribuição granulométrica do minério alimentado à PCI da Metso é apresentada na Tabela 7. Observa-se que 100% do minério era passante em 6 mm, conforme malha utilizada na instalação industrial existente.

Tabela 7 – Distribuição granulométrica da alimentação – Caso C

Tamanho (mm)	% passante
6	100
4	99
2	88
1	63
0,5	44

A amostra foi primeiramente ensaiada na PCI com a umidade natural de 2,4% e em seguida disposta ao sol até atingir umidade próxima a zero. Na sequência, foram conduzidos mais três ensaios, com 0%, 3,4% e 4,4% de umidade. A Figura 25 apresenta o gráfico da eficiência de peneiramento em função do tempo, e a Tabela 8, os resultados de peneirabilidade em função da umidade.

Figura 25 – Eficiência de peneiramento em função do tempo – Caso C

Tabela 8 – Cálculo da capacidade específica – Caso C

Descrição do teste	Altura de camada	Peso da amostra	Densidade Aparente	Tempo para atingir 90 % de eficiência	Fator de capacidade
	(m)	(kg)	(t/m ³)	(s)	t/h/m ²
Teste Seco - Tela de aço 1 x 1 mm	0,015	2,45	2,28	18,6	6,62
Teste In Natura (2,39% de umidade) - Tela de aço 1 x 1 mm	0,017	2,50	2,22	16,7	8,14
Teste 3,39% de umidade - Tela de aço 1 x 1 mm	0,020	2,53	2,23	38,6	4,17
Teste 4,39% de umidade - Tela de aço 1 x 1 mm	0,018	2,56	2,29	55,4	2,68

O ensaio com a amostra *in natura* demorou 16,7 segundos para atingir uma eficiência de 90%, enquanto o resultado com minério pós-secagem demorou 18,6 segundos. Assim, a umidade natural não demonstrou efeito expressivo no resultado do ensaio.

Após o ensaio com minério seco, mais 1% de água foi adicionado até atingir 3,4% de umidade. Nessa umidade, a peneirabilidade foi reduzida de forma significativa, atingindo 4,17 t/h/m², praticamente a metade do valor da amostra *in natura*.

Um último ensaio foi realizado com mais 1% de água (4,4%). Nesse caso, a capacidade específica foi calculada em 2,68 t/h/m². Nesse ensaio já foi possível notar que muitas aberturas começaram a entupir e, por esse motivo, umidades superiores a 4,4% foram consideradas inexequíveis. Da mesma forma que o Caso B, não houve efeito de cimentação entre partículas que pudesse ser observado.

Figura 26 – Capacidade específica *versus* umidade para tela de 1,0 mm

A partir dos resultados desses ensaios, o projeto de implantação desse peneiramento foi temporariamente suspenso. Não se mostrou ser economicamente viável peneirar em malhas tão finas, pois eram necessárias peneiras de áreas muito

grandes. Novos estudos estão em curso, visando encontrar soluções de processos mais viáveis e que também minimizem riscos.

A Figura 27 apresenta um gráfico comparativo dos resultados dos três ensaios mencionados até agora: A, B e C. 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.

As curvas podem servir como uma primeira referência para o dimensionamento e a seleção de peneiras em uma nova instalação de britagem. Em peneiramentos conduzidos em aberturas consideradas grandes, como 16 mm, tanto a capacidade específica como a umidade crítica são relativamente altas. Não obstante, caso o projeto necessite peneirar abaixo de 9,5 mm, há uma redução muito significativa em ambos os índices, sendo que umidades de 5% ou mais já podem trazer graves problemas à operação.

Figura 27 – Capacidade específica em função do tempo para os Casos A, B e C

De modo a tornar as análises mais abrangentes, decidiu-se incluir resultados obtidos com peneiramentos na PCI de minérios de ferro com características muito peculiares, diferentes, portanto, da maioria dos minérios de ferro brasileiros. O

primeiro, denominado Caso D, possui expressiva quantidade de minerais hidratados em sua composição mineralógica, enquanto o segundo, denominado Caso E, trata-se de minério de ferro com relativamente baixa densidade aparente, devido, principalmente, à respectiva alta porosidade.

A próxima seção apresenta os resultados obtidos com os assim denominados minérios de ferro atípicos.

5.2 Ensaios com Minérios de Ferro Atípicos

5.2.1 Caso D (Abertura de 25 mm)

O quarto grupo de ensaios apresentado neste trabalho foi realizado com uma amostra composta predominantemente por itabirito friável encontrado na região do Quadrilátero Ferrífero. Essa amostra continha, em sua composição mineralógica, uma quantidade significativa do mineral goethita, um óxido de ferro hidratado.

A goethita e alguns outros óxidos de ferro hidratados são minerais que se destacam por conter determinadas propriedades aderentes, geralmente acarretando dificuldade ao processo de peneiramento. São minerais bastante frágeis e quebradiços que fragmentam em granulometria muito fina quando submetidos a cominuição por impacto, atrição ou cisalhamento.

O tipo de tela utilizado nos ensaios do Caso D foi em aço com 25 mm de abertura. Trata-se, portanto, da maior abertura utilizada entre todos os casos descritos neste trabalho. A distribuição granulométrica do minério alimentado à PCI da Metso é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Distribuição granulométrica da alimentação – Caso D

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

Embora a goethita seja um mineral bastante frágil, a distribuição granulométrica de alimentação não apresentou quantidade elevada de finos, se comparado aos demais minérios processados. A título de comparação, enquanto a quantidade de material passante em 1,19 mm do Caso D foi 32%, nos Casos A e B foram, respectivamente, de 49% e 25%.

No Caso D foram realizados sete ensaios de peneiramento, variando-se a umidade de 2% a 9%. A Figura 28 apresenta uma imagem de um instante do ensaio realizado na umidade crítica. Foi possível notar que as telas estavam limpas, sem minério aderido, porém as partículas finas e grossas se aglutinaram, tornando o minério com consistência pastosa.

Figura 28 – Superfície de peneiramento na umidade crítica do Caso D

A Figura 29 apresenta os resultados da eficiência do peneiramento do minério no Caso D em função do tempo para os diferentes conteúdos de umidade ensaiados na PCI.

Figura 29 – Eficiência de peneiramento em função do tempo – Caso D

Pode-se observar um comportamento significativamente diferente dos ensaios com minérios de ferro típicos. Até 6%, o peneiramento atingiu rapidamente o valor de 90% de eficiência, com peneirabilidade bastante alta. Todavia, em 7% de umidade, ocorreu um aumento expressivo no tempo de ensaio para atingir os mesmos 90% de eficiência.

Nos ensaios com 8% e 9% de umidade, foi observado um período bastante extenso para alcançar o patamar de 90% de eficiência e não foi possível superar esse limite. Esse resultado evidencia o efeito da aderência entre as partículas, principalmente as muito finas, que continuaram retidas no deque mesmo após 1 minuto de ensaio.

A peneirabilidade foi reduzida de 98 t/h/m² em 6% de umidade para 36 t/h/m² com apenas 1% de acréscimo de água, conforme mostrado na Tabela 10. A umidade crítica foi alcançada em 8%.

Tabela 10 – Cálculo da capacidade específica – Caso D

Descrição do teste	Altura de camada (m)	Peso da amostra (kg)	Densidade Aparente (t/m ³)	Tempo para atingir 90% de eficiência (s)	Fator de capacidade t/h/m ²
Teste 1: Umidade Inicial 2 %, Tela de aço 25x25 mm, Amplitude 5mm e rotação 900rpm (4.5G)	0,035	50,00	2,89	2,5	144,00
Teste 2: Umidade 4 %, Tela de aço 25x25 mm, Amplitude 5mm e rotação 900rpm (4.5G)	0,040	51,02	2,53	1,8	204,08
Teste 3: Umidade 6 %, Tela de aço 25x25 mm, Amplitude 5mm e rotação 900rpm (4.5G)	0,040	52,08	2,59	3,8	98,69
Teste 4: Umidade 7 %, Tela de aço 25x25 mm, Amplitude 5mm e rotação 900rpm (4.5G)	0,040	52,63	2,65	10,5	36,09
Teste 5: Umidade 8 %, Tela de aço 25x25 mm, Amplitude 5mm e rotação 900rpm (4.5G)	0,038	53,19	2,79	27,0	14,19
Teste 6: Umidade 8 %, Tela de aço 25x25 mm, Amplitude 5mm e rotação 1000rpm (5.5G)	0,039	53,19	2,74	21,0	18,24
Teste 7: Umidade 9 %, Tela de aço 25x25 mm, Amplitude 5mm e rotação 900rpm (4.5G)	0,039	53,77	2,74	15,0	25,81

A Figura 30 apresenta o gráfico comparativo entre as capacidades específicas para a hematita friável do Caso A (com abertura de tela de 16 mm) e para o minério *blend* itabirito/goethita do Caso D.

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.

Figura 30 – Capacidade específica em função do tempo para os Casos A e D

Após atingir a umidade crítica com 8%, foram realizados mais dois ensaios, no primeiro mantendo-se a umidade em 8%, porém aumentando a aceleração da PCI 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 peneirabilidades superiores, confirmando assim que a umidade crítica havia sido superada.

Os resultados desse grupo de ensaios são bastante característicos para minérios de ferro que possuem minerais hidratados em sua composição, como a goethita. As umidades críticas são alcançadas mais rapidamente, o que aumenta o risco de obter-se um peneiramento industrial ineficiente.

Deve-se enfatizar que é muito importante que seja conduzida uma caracterização mineral completa para os novos projetos de minério de ferro, quantificando-se os minerais hidratados presentes no minério. Caso haja minerais hidratados em sua composição, é fundamental um estudo detalhado do peneiramento para que sejam evitados potenciais graves problemas durante a operação. Geralmente peneiramentos difíceis demandam soluções caras, como a inclusão de secadores, ou soluções indesejáveis, como o peneiramento com *sprays* de lavagem.

5.2.2 Caso E (Abertura de 12 mm)

O último grupo de ensaios com minério de ferro apresentado neste trabalho foi realizado com uma amostra composta, predominantemente, de itabirito friável oriundo de jazida localizada próxima à cidade de Belo Horizonte (MG).

Esse grupo de ensaio foi incluído no presente trabalho em função de uma propriedade bastante peculiar desse minério, que era a baixa densidade aparente. A amostra apresentava visivelmente alta porosidade, bem como ausência de minerais hidratados, como goethita ou limonita, que poderiam prejudicar o peneiramento.

Os ensaios do Caso E foram realizados com telas em aço com 12 mm de abertura. A distribuição granulométrica do minério alimentado à PCI da Metso é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Distribuição granulométrica da alimentação – Caso E

Tamanho (mm)	% passante
38	100
25	97,3
19	96,4
12,5	95,4
9,5	94,6
4,75	92,0
1,19	69,4

O caso E incluiu a realização de dez ensaios na PCI, variando-se a umidade de 0% a 15%. Os resultados dos ensaios são mostrados na Figura 31, e os cálculos de peneirabilidade em função das umidades são mostrados na Tabela 12.

Figura 31 – Eficiência de peneiramento em função do tempo para o Caso E

Tabela 12 – Cálculo da capacidade específica – Caso E

Descrição do teste	Altura de camada (m)	Densidade Aparente (t/m ³)	Tempo para (s)	Fator de capacida t/h/m ²
Teste 1: umidade: 0%, Tela de aço 12x12mm, amplitude de 4,5mm e rotação de 950rpm (5G)	0,05	1,93	6,83	52,7
Teste 2: umidade: 4%, Tela de aço 12x12mm, amplitude de 4,5mm e rotação de 950rpm (5G)	0,07	1,50	5,71	65,7
Teste 3: umidade: 6%, Tela de aço 12x12mm, amplitude de 4,5mm e rotação de 950rpm (5G)	0,07	1,57	6,85	55,9
Teste 4: umidade: 8%, Tela de aço 12x12mm, amplitude de 4,5mm e rotação de 950rpm (5G)	0,06	1,71	8,5	46,1
Teste 5: umidade: 10%, Tela de aço 12x12mm, amplitude de 4,5mm e rotação de 950rpm (5G)	0,06	1,80	13,88	28,8
Teste 6: umidade: 11%, Tela de aço 12x12mm, amplitude de 4,5mm e rotação de 950rpm (5G)	0,06	1,82	16,5	24,5
Teste 7: umidade: 12%, Tela de aço 12x12mm, amplitude de 4,5mm e rotação de 950rpm (5G)	0,06	1,84	24	17,0
Teste 8: umidade: 13%, Tela de aço 12x12mm, amplitude de 4,5mm e rotação de 950rpm (5G)	0,06	1,86	33	12,5
Teste 9: umidade: 14%, Tela de aço 12x12mm, amplitude de 4,5mm e rotação de 950rpm (5G)	0,05	2,13	61	6,9
Teste 10: umidade: 15%, Tela de aço 12x12mm, amplitude de 4,5mm e rotação de 950rpm (5G)	0,06	1,89	39,7	10,7

Observou-se que até 8% de umidade, a peneirabilidade foi bem alta, acima de 40 t/h/m². Até mesmo em umidades bastante elevadas, como 11%, o peneiramento foi considerado como razoavelmente bom.

Os resultados obtidos no Caso E foram comparados aos do Caso B devido à proximidade das aberturas das malhas utilizadas nos ensaios, respectivamente 12 mm para o Caso E e 9,5 mm para o Caso B. Nota-se na Figura 32 uma expressiva diferença entre os resultados desses ensaios para todas as umidades ensaiadas. A faixa de umidade crítica do Caso E foi alcançada somente em 14%, enquanto no Caso B foi alcançada já na faixa de 6% a 7%.

Figura 32 – Capacidade específica em função do tempo para os Casos B e E

Esse resultado bastante atípico foi aqui interpretado em função de três aspectos selecionados. O primeiro é que a granulometria de alimentação da amostra Caso E foi a mais fina entre todos os ensaios. A prática indica que quanto maior a quantidade de finos, maior será o poder de absorção de água do minério e maior o período necessário para que a amostra atinja o estado de saturação. Além disso, o minério se mostrou bastante poroso, o que também contribuiu para a maior absorção de água. Por fim, o minério não contém minerais aderentes em sua composição, o que reduziu o efeito de cimentação entre as partículas e o cegamento das telas.

5.3 Ensaio com Bauxita – Casos F e G

A grande maioria dos ensaios de peneiramento à umidade natural realizados nos laboratórios da Metso, em Sorocaba (SP), foram conduzidos com minério de ferro, em virtude da grande quantidade de jazidas em exploração no Brasil. No entanto, outros tipos de minério também apresentam dificuldades no peneiramento à umidade natural, como é o caso da bauxita, encontrada principalmente no Norte do Brasil.

A amostra selecionada de bauxita, proveniente do Pará, apresenta participação importante na indústria mineral brasileira e, ao contrário do minério de ferro, apresenta densidade mais baixa e, muitas vezes, é bastante pegajosa. A distribuição granulométrica da bauxita alimentada à PCI da Metso é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Distribuição granulométrica da alimentação – Caso bauxita

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

Foram escolhidas duas aberturas para os ensaios, respectivamente 6,35 mm e 8 mm, ambas com telas de aço. A amostra foi primeiramente exposta ao sol para a primeira etapa de secagem. Após um período de seis horas de exposição, ela já se mostrava praticamente seca.

Uma pequena alíquota da bauxita foi retirada da pilha, pesada e em seguida colocada na estufa para cálculo da umidade. Contudo, foi interessante notar que, após uma hora dentro da estufa, a amostra foi retirada e ainda houve uma redução considerável na massa inicial.

O cálculo de umidade indicou que a alíquota retirada da pilha, embora aparentemente seca, ainda continha 7% de umidade. Os ensaios foram então iniciados a partir desse valor, diferentemente dos ensaios com minério de ferro, que partiram sempre com umidades próximas a zero.

Figura 33 – Amostra de bauxita em pilha em preparação para os ensaios

Primeiramente foram conduzidos ensaios com telas de 6,35 mm, com aumento gradativo da umidade até 19%. Em seguida foram realizados os ensaios com telas de 8,0 mm, acompanhando exatamente o mesmo procedimento utilizado para as telas de 6,35 mm.

A Figura 34 e a Tabela 14 apresentam os resultados dos ensaios realizados com telas de abertura de 6,35 mm, denominado Caso F, enquanto a Figura 35 e a Tabela 15 apresentam os resultados dos ensaios realizados com telas de 8,0 mm, denominado Caso G.

Figura 34 – Eficiências de peneiramento em função do tempo para o Caso F

Tabela 14 – Cálculo da capacidade específica – Caso F

Descrição do teste	Altura de camada (m)	Peso da amostra (kg)	Densidade Aparente (t/m³)	Tempo para atingir 90 % de eficiência (s)	Fator de capacidade t/h/m²
Teste 1: Umidade de 7%, tela de aço de 6,3x6,3mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,061	50,00	1,63	9,5	37,89
Teste 2: Umidade de 9%, tela de aço de 6,3x6,3mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,072	51,02	1,41	11,0	33,38
Teste 3: Umidade de 11%, tela de aço de 6,3x6,3mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,075	52,09	1,39	15,0	25,01
Teste 4: Umidade de 13 %, tela de aço de 6,3x6,3mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,078	53,19	1,36	22,0	17,41
Teste 5: Umidade de 15%, tela de aço de 6,3x6,3mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,081	54,35	1,34	67,0	5,85
Teste 6: Umidade de 17%, tela de aço de 6,3x6,3mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,084	55,56	1,32	178,0	2,25
Teste 6.1: Umidade de 17%, tela de aço de 6,3x6,3mm, amplitude de 5mm e rotação de 1000 rpm (5.5G)	0,084	55,56	1,32	172,0	2,33
Teste 7: Umidade de 19%, tela de aço de 6,3x6,3mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,087	56,82	1,31	133,0	3,07

Figura 35 – Eficiências de peneiramento em função do tempo para o Caso G

Tabela 15 – Cálculo da capacidade específica – Caso G

Descrição do teste	Altura de camada (m)	Peso da amostra (kg)	Densidade Aparente (t/m ³)	Tempo para atingir 90 % de eficiência (s)	Fator de capacidade t/h/m ²
Teste 1: Umidade de 7%, tela de aço de 8x8mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,061	50,00	1,63	7,5	48,00
Teste 2: Umidade de 9%, tela de aço de 8x8mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,072	51,02	1,41	8,0	45,90
Teste 3: Umidade de 11%, tela de aço de 8x8mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,075	52,09	1,39	10,5	35,73
Teste 4: Umidade de 13 %, tela de aço de 8x8mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,078	53,19	1,36	16,5	23,21
Teste 5: Umidade de 15%, tela de aço de 8x8mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,081	54,35	1,34	29,5	13,28
Teste 6: Umidade de 17%, tela de aço de 8x8mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,084	55,56	1,32	186,0	2,15
Teste 6.1: Umidade de 17%, tela de aço de 8x8mm, amplitude de 5mm e rotação de 1000 rpm (5.5G)	0,084	55,56	1,32	86,0	4,65
Teste 7: Umidade de 19%, tela de aço de 8x8mm, amplitude de 5mm e rotação de 900rpm (4.5G)	0,087	56,82	1,31	140,0	2,92

Os resultados mostraram 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 36. Os resultados também mostraram 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 36 – Capacidade específica para os Casos F e G

Após o ensaio em 17% de umidade e aceleração-padrão de 4,5 G (900 rpm), foi observado que havia muita bauxita aderida às telas, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Bauxita aderida às telas após ensaio na umidade crítica

Um novo ensaio foi realizado aumentando aceleração para 5,5 G (1000 rpm), a partir do qual verificou-se um aumento significativo na capacidade específica para os ensaios com telas de 8 mm, conforme ilustrado em linhas pontilhadas na Figura 36.

O ensaio com alta aceleração 5,5 G para a tela de 6,35 mm não resultou em ganho significativo. Esse fato é interpretado em função de as telas em 6,35 mm serem muito pouco flexíveis, não permitindo que a bauxita desagregasse dos fios. A tela de 8 mm era mais flexível e mostrou menos tendência à aderência em alta aceleração.

6 COMPARAÇÕES 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 diferente pode ser o desempenho de um peneiramento à umidade natural, dependendo das características do minério ensaiado, da abertura de peneiramento e dos parâmetros do equipamento.

No presente capítulo os resultados de peneirabilidade obtidos nos ensaios experimentais foram comparados aos resultados obtidos utilizando-se o método de seleção de peneiras da Allis-Chalmers.

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.

6.1 Resultados da PCI contra Método Allis-Chalmers

6.1.1 Comparativo Caso A

A primeira comparação foi realizada entre os resultados de peneirabilidade obtidos nos ensaios com minério de ferro do Caso A e os resultados de capacidade específica corrigida de peneiramento, denominada CEC, ou peneirabilidade calculada, que pode ser obtida partindo-se da fórmula do método Allis-Chalmers, abaixo repetida:

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

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

Ou seja, o parâmetro CEC é o produto dos fatores C, M, K e Q.

Os parâmetros principais do ensaio do Caso A foram: tipo de tela em aço com 16 mm de abertura e aberturas quadradas, com área aberta de 50%. Os valores adotados para os fatores foram os seguintes:

- Ø fator C (capacidade): 25 m³/h/m², conforme apresentado no gráfico da Figura 13;
- Ø fator M (material retido): 0,97, uma vez que 10% da alimentação ficou retido em 16 mm, conforme apresentado no gráfico da Figura 14;
- Ø fator K (material passante em meia malha): 1,83, uma vez que 82% da alimentação foi passante na meia malha (8,0 mm), conforme apresentado no gráfico da Figura 15;
- Ø Q1 (posição do deque): 1 – a peneira tem apenas um deque;
- Ø Q2 (formato da partícula): 0,9 – devido ao formato predominantemente lamelar;
- Ø Q3 (peneiramento via úmida): 1 – por se tratar de peneiramento em via seca;
- Ø Q4 é o índice relativo à umidade do material objeto principal deste trabalho. Para os cálculos apresentados neste capítulo, o valor de Q4 foi extraído do ábaco da Figura 17, conforme discussão inserida na revisão bibliográfica. Em alguns casos não se encontrou o valor de Q4 e por isso foi necessário fazer extrapolações;
- Ø Q5: 1 por ser tela de arame quadrada e ter 50% de área aberta;
- Ø Q6: 1 devido ao movimento linear da PCI.

O cálculo da CEC foi baseado na multiplicação dos valores adotados para os parâmetros C, M, K, Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 e Q6 acima, resultando em 35,9 m³/h/m² para a umidade de 6% e fator Q4 de 0,88. Multiplicando este valor pela densidade média aparente de 2,5 t/m³ do minério de ferro, a CEC resultou em 90,3 t/h/m².

O resultado da peneirabilidade obtido no ensaio com a PCI do Caso A com amostra a 6% de umidade de 75 t/h/m² foi selecionado para exemplificar melhor essa comparação.

A Figura 38 apresenta os resultados experimentais de peneirabilidade do Caso A *versus* os resultados da CEC obtidos pela planilha de 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 38 – Capacidades específicas para o Caso A contra CEC Allis-Chalmers

Destaca-se aqui que para umidade de 8%, a peneirabilidade do ensaio foi de 38 t/h/m², enquanto a CEC calculada ficou em 41 t/h/m². O valor para Q4 adotado nesse último foi 0,4, conforme ábaco da Figura 17. Os resultados foram praticamente coincidentes.

A parte que corresponde a umidades maior que 8% na curva obtida pelo método Allis-Chalmers foi representada por uma linha tracejada. Esse recurso foi utilizado em função de não ter sido encontrada nenhuma literatura indicativa sobre o comportamento do minério nesses pontos. A curva criada seguiu uma tendência

arbitrária, porém considerada típica, com base nos pontos anteriores. A umidade crítica do ensaio foi atingida entre 9% e 10%, sendo que a estimativa feita pelo programa foi praticamente idêntica.

6.1.2 Comparativo Caso B

A segunda comparação foi realizada entre os resultados de peneirabilidade obtidos nos ensaios do minério de ferro do Caso B e os resultados da CEC calculados a partir do método Allis-Chalmers, este último com os respectivos parâmetros experimentais obtidos a partir dos mesmos ensaios.

A tela usada no ensaio foi em aço com 9,5 mm e abertura quadrada, com uma área livre de 40%. Os valores adotados para os fatores foram os seguintes:

- Ø fator C (capacidade): $18 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$;
- Ø fator M (material retido): 1,16, uma vez que 48% da alimentação ficou retida em 9,5 mm;
- Ø fator K (material passante em meia malha): 0,97, uma vez que 38% da alimentação foi passante em 4,75 mm;
- Ø Q1 (posição do deque): 1 – a peneira tem apenas um deque;
- Ø Q2 (formato da partícula): 0,9 – devido ao formato predominantemente lamelar;
- Ø Q3 (peneiramento via úmida): 1 – peneiramento via seca;
- Ø Q4 (índice relativo à umidade do material): valor 1 para 2% de umidade, conforme ábaco da Figura 17;
- Ø Q5: 0,8 por ser tela de arame quadrada e ter porcentagem de área aberta de 40%;
- Ø Q6: 1 devido ao movimento linear da PCI.

O cálculo da CEC foi baseado na multiplicação dos valores adotados para os parâmetros C, M, K, Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 e Q6 acima, resultando em $14,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Multiplicando esse valor pela densidade média aparente de $2,2 \text{ t}/\text{m}^3$ do minério de ferro, a CEC resultou em $32 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$. A curva do ensaio na PCI indicou uma peneirabilidade de $35 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$ para os mesmos 2% de umidade.

A Figura 39 apresenta as curvas comparativas entre os resultados de peneirabilidade obtidos na PCI do Caso B *versus* os resultados calculados pelo método da Allis-Chalmers.

Figura 39 – Capacidades específicas para o Caso B contra CEC Allis-Chalmers

Em umidades próximas a zero, a peneirabilidade do ensaio foi considerada muito fácil ($50 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$), enquanto o cálculo estimou uma CEC de $32 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$, valor considerado médio. Já para umidade de 4%, o cálculo Allis-Chalmers continuou indicando uma CEC média, próxima a $30 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$, enquanto o ensaio demonstrou peneirabilidade reduzida a $20 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$.

Uma interpretação da diferença de resultados acima apresentada é o fato de o fator Q4 ser sempre próximo 1,0 para umidades baixas. Não obstante, o ensaio

indicou que a peneirabilidade pode ser significativamente afetada mesmo em umidades consideradas baixas, contrariando assim um dos princípios do método.

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 da Figura 39 que as curvas pivotam em umidade entre 2% e 3%. Na prática isso pode gerar incertezas na seleção da peneira industrial pelo usuário.

6.1.3 Comparativo Caso C

A terceira comparação foi realizada entre os resultados de peneirabilidade obtidos nos ensaios com minério de ferro do Caso C e os resultados calculados a partir do método Allis-Chalmers, este último com os respectivos parâmetros experimentais obtidos a partir dos mesmos ensaios.

A tela usada no ensaio foi em aço com 1,0 mm de abertura quadrada, com uma área livre de 25%. Os valores adotados para os fatores foram os seguintes:

- Ø fator C (capacidade): 4,5 m³/h/m²;
- Ø fator M (material retido): 1,08, uma vez que 35% da alimentação ficou retida em 1,0 mm;
- Ø fator K (material passante em meia malha): 1,08, uma vez 44% da alimentação foi passante em 0,5 mm;
- Ø Q1 (posição do deque): 1 – a peneira tem apenas um deque;
- Ø Q2 (formato da partícula): 1 – devido ao formato predominantemente cúbico;
- Ø Q3 (peneiramento via úmida): 1 – peneiramento via seca;
- Ø Q4 (índice relativo à umidade do material): 0,7 para 3% de umidade, conforme ábaco da Figura 17;
- Ø Q5: 0,5 por ser tela de arame quadrada e área aberta de 25%;
- Ø Q6: 1 devido ao movimento linear da PCI.

O cálculo da CEC foi baseado na multiplicação dos valores adotados para os parâmetros C, M, K, Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 e Q6 acima, resultando em $1,85 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Multiplicando esse valor pela densidade média aparente de $2,25 \text{ t}/\text{m}^3$ do minério de ferro, a CEC resultou em $4,2 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$.

A curva do ensaio em peneira infinita indicou uma capacidade específica de $5,5 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$ para 3% de umidade.

A Figura 40 apresenta as curvas comparativas entre os resultados do ensaio na PCI do Caso C *versus* os resultados calculados pelo método Allis-Chalmers.

Figura 40 – Capacidades específicas para o Caso C contra CEC Allis-Chalmers

De forma geral, o gráfico da Figura 40 apresenta boa aderência entre os dois métodos para umidades superiores a 3%. Esse foi o ensaio que apresentou melhor correlação entre os valores obtidos no laboratório e os cálculos da planilha.

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. Em alguns pontos específicos, os valores foram praticamente idênticos. O método Allis-Chalmers pode

assim ser considerado um recurso útil, ao passo que alguns desvios são inerentes ao cálculo e devem ser analisados com prudência.

A peneirabilidade obtida nos ensaios dos Casos D e E, que incluem minérios de ferro atípicos, também foi comparada aos resultados calculados através do método Allis-Chalmers, conforme descritos na próxima seção.

6.1.4 Comparativo Caso D

O ensaio com minério de ferro do Caso D foi realizado com telas de abertura 25 mm. Alguns estudos e teorias mencionados na revisão bibliográfica indicam que a peneirabilidade deveria apresentar pouca ou nenhuma influência da umidade para aberturas acima de 25 mm. Esta afirmativa pode ser observada no ábaco da Figura 17, em que os valores do fator Q4 somente são mostrados até o tamanho de 24 mm. Mesmo para valores altos de umidade como 8%, o fator Q4 é muito próximo a 1 segundo esse mesmo ábaco.

No exemplo do Caso D não foi possível utilizar o ábaco para obter o valor de Q4, pois para abertura acima de 25 mm considera-se o fator Q4 igual a 1,0. Desta forma, foi utilizada a recomendação básica do método Allis-Chalmers, que assim determina: até 3% de umidade, utilizar Q4 igual a 1; até 6%, igual a 0,85; e para 8%, 0,7. Esses valores tornaram as estimativas de peneirabilidade mais pessimistas. A Figura 41 apresenta as curvas comparativas de peneirabilidade do ensaio do Caso D e o cálculo feito pelo método Allis-Chalmers.

A faixa que corresponde a umidades maiores que 8% na curva obtida pelo método Allis-Chalmers está representada por uma linha tracejada, ou seja, uma extrapolação baseada em tendência, uma vez que na literatura analisada neste trabalho não foi encontrada nenhuma fórmula ou recomendação técnica para estimar o comportamento do minério nesses pontos. A curva criada seguiu a tendência derivada dos pontos anteriores.

Figura 41 – Capacidades específicas para o Caso D contra CEC Allis-Chalmers

A CEC calculada pelo método em 6% foi praticamente a mesma obtida no ensaio. O cálculo foi realizado multiplicando-se os fatores C (33), M (0,98), K (1,64) e Q_n (0,85), resultando em $45 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Multiplicando esse valor pela densidade média aparente de $2,3 \text{ t}/\text{m}^3$ do minério de ferro, a CEC resultou em $103 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$ para 6% de umidade. A curva do ensaio na PCI indicou uma peneirabilidade de $98 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$ para os mesmos 6% de umidade.

Embora o método Allis-Chalmers tenha apresentado resultado similar para 6% de umidade, isto não significou boa previsibilidade para as demais umidades. Em 8%, por exemplo, a peneirabilidade do ensaio foi reduzida drasticamente para $14 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$, enquanto o cálculo indicou uma CEC de $85 \text{ t}/\text{h}/\text{m}^2$. A umidade crítica foi alcançada em 8%, ao passo que o cálculo segundo o método Allis-Chalmers estimou atingi-la somente entre 13% e 14%.

Os resultados do Caso D demonstraram os desvios resultantes da aplicação do método Allis-Chalmers para minério de ferro com a presença de minerais hidratados. Nesse caso, estimativas do método Allis-Chalmers são excessivamente otimistas para umidades de alimentação superiores a 6%, podendo ocasionar graves desvios no dimensionamento em peneiras industriais.

6.1.5 Comparativo Caso E

O ensaio de peneiramento com minério de ferro para o Caso E foi realizado com telas de abertura de 12 mm e minério de ferro bastante poroso e com densidade aparente medida de $1,85 \text{ t/m}^3$, valor este considerado relativamente baixo. Além disso, o minério não continha traços de minerais hidratados em sua composição mineralógica. A Figura 42 apresenta as curvas comparativas de peneirabilidade obtidas no ensaio e o cálculo efetuado de acordo com o método Allis-Chalmers.

Como já observado em casos anteriores, novamente foi possível notar que os resultados da CEC previstos pelo método em umidades baixas (inferiores a 5%) foram próximos aos resultados dos ensaios. Não obstante, a partir dos 5% o fator Q4 começou a exercer forte influência no valor da CEC calculada, ao passo que os resultados dos ensaios na PCI mostraram que a umidade influenciava a peneirabilidade de forma muito branda. A partir de 6% os resultados de capacidade específica divergiram fortemente.

Figura 42 – Capacidades específicas para o Caso E contra CEC Allis-Chalmers

Os ensaios em PCI demonstraram que o valor crítico para esse minério de ferro poroso foi alcançado apenas em 14% de umidade. O resultado foi significativamente

diferente da umidade crítica obtida utilizando-se o método Allis-Chalmers, alcançada na faixa de 8% a 9%.

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 um equipamento muito maior do que o necessário. Considerando-se, por exemplo, umidade de alimentação da peneira de 7%, o ensaio com a PCI confirmou uma peneirabilidade de 51 t/h/m², enquanto o método Allis-Chalmers estimou uma CEC de somente 25 t/h/m². Isto significaria uma área de peneiramento duas vezes maior que a área realmente necessária.

6.1.6 Comparativo Casos F e G

Além das cinco comparações de peneirabilidade feitas para minério de ferro, foram realizadas também duas comparações para a amostra de bauxita, variando-se a abertura da malha de peneiramento.

Essas comparações mereceram destaque neste trabalho, pois foram os ensaios que apresentaram maiores desvios em comparação ao método de dimensionamento Allis-Chalmers.

Embora a bauxita apresente características tipicamente bastante pegajosas, essa propriedade começou a influenciar o desempenho do peneiramento de maneira muito negativa apenas em umidades bem elevadas, acima de 12%.

A Figura 43 exibe as curvas de peneirabilidade da bauxita obtidas nos ensaios na PCI com abertura de 8 mm e 6,3 mm, assim como os resultados das CEC calculadas através do método de Allis-Chalmers, apresentadas nas curvas tracejadas. As peneirabilidades da bauxita obtidas por meio da PCI não apresentam nenhuma relação com os resultados de CEC calculados.

Figura 43 – Capacidades específicas para os Casos F e G contra CEC Allis-Chalmers

Os ensaios com as amostras em 7% de umidade mostraram uma peneirabilidade bastante fácil, com capacidades específicas acima de 40 t/h/m², enquanto o método Allis-Chalmers de cálculo já indicava o atingimento da umidade crítica.

Devido à baixa densidade aparente da amostra de bauxita, na faixa de 1,4 t/m³, para a mesma massa inicial do ensaio na PCI (50 kg), maior é o volume de material em comparação ao minério de ferro. Esse maior volume de material proporciona um maior poder de absorção de água da bauxita. A umidade crítica só é atingida após grande adição de água, até que se chegue a valores de umidade normalmente superiores a 15%.

Não foi encontrada na literatura pesquisada nenhum método de cálculo que incluísse previsões para o peneiramento em umidades tão elevadas. Assim, para os casos de bauxita analisados sob as umidades ensaiadas, o método físico de dimensionamento com base na PCI se mostrou fundamental para estimar o comportamento do minério e melhorar a previsibilidade do desempenho do peneiramento em escala industrial.

7 COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DA PENEIRA INFINITA E DE PENEIRAS INDUSTRIAIS

Neste capítulo os resultados de peneirabilidade obtidos nos ensaios do Caso A foram comparados aos resultados obtidos a partir de peneiramento em escala industrial com o mesmo tipo de minério. As comparações incluíram três tipos distintos de peneiras industriais, sendo a primeira inclinada convencional de movimento circular, a segunda inclinada de perfil banana com movimento linear e a terceira também de perfil banana, porém com movimento elíptico. Para cada peneira foram realizadas duas vistorias, uma no período seco, com umidades variando na faixa de 6%, e uma no período chuvoso, com umidades em torno de 10%. No total, foram seis vistorias industriais.

7.1 Resultados da Peneira Infinita contra Peneira Industrial

Dentre os cinco diferentes ensaios com minério de ferro analisados anteriormente, o Caso A foi utilizado para comparar os resultados das estimativas baseadas na PCI com o desempenho de peneiras industriais em uma instalação de beneficiamento de minério de ferro de grande porte, processando o mesmo tipo de minério.

Como mencionado, o minério do Caso A era composto predominantemente de hematita friável, praticamente isenta de minerais hidratados. A tela escolhida para o ensaio foi aço de 16 mm, mesma abertura utilizada nas peneiras industriais. A Figura 44 apresenta a curva de peneirabilidade para o minério do Caso A, conforme obtida a partir dos ensaios com a PCI.

Figura 44 – Capacidade específica em função da umidade – Caso A

O ensaio mostrou que a peneirabilidade foi bem alta (acima de 70 t/h/m²) para umidades de até 6% e que, a partir desse ponto, o desempenho do peneiramento começou a diminuir, atingindo a umidade crítica na faixa de 9% a 10%. Esses resultados obtidos na PCI em laboratório serviram de base para as comparações feitas com os dados apurados a partir da operação de peneiras industriais.

É importante mencionar que, para a tomada das medidas em escala industrial, o procedimento adotado foi bastante limitado, já que não havia possibilidade de parar a operação para coleta de amostras sobre as correias de alimentação, *oversize* e *undersize*. nem a facilidade para realizar amostragens representativas, estando as peneiras em operação. Assim, as medidas inferidas nas inspeções industriais foram realizadas com as peneiras operando de forma contínua.

As capacidades instantâneas das peneiras industriais foram gravadas durante a operação, buscando manter um fluxo de alimentação estável ao mesmo tempo que gerasse boa eficiência. As eficiências reais não puderam ser medidas fisicamente, porém foi visivelmente aferida pelos operadores da instalação, bastante acostumados ao processo.

A peneirabilidade das peneiras industriais foi então definida como sendo a capacidade média, conforme observado durante o período de inspeção, dividida pela área total da peneira.

7.1.1 Comparação da Peneira de Laboratório contra Peneira Circular

A primeira comparação apresentada neste capítulo foi realizada utilizando os dados de peneirabilidade obtidos nos ensaios do 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.

A capacidade média da peneira foi registrada em um intervalo de uma hora durante época seca do ano, quando a umidade média do minério peneirado oscila na faixa de 6%. A taxa de alimentação média da peneira foi de 900 t/h, resultando em eficiência considerada típica da operação. Vazões de alimentação acima desse valor geraram sobrecarga de material retido, reduzindo a eficiência de classificação.

A capacidade específica real no período seco foi então calculada dividindo-se a vazão horária de alimentação de 900 t/h pela área de peneiramento de 14,6 m², resultando em uma peneirabilidade de 61,6 t/h/m².

Outra inspeção semelhante à primeira foi realizada no período chuvoso, quando as umidades de alimentação facilmente atingem 10% ou mais. Durante o período da inspeção, a taxa de alimentação média foi reduzida significativamente a 400 t/h, resultando em uma peneirabilidade de 27,3 t/h/m². A Figura 45 apresenta o gráfico comparativo entre os resultados na PCI contra os resultados em escala industrial na peneira circular. De forma simplista, os dois pontos obtidos a partir dos dados conseguidos no peneiramento industrial foram ligados por uma linha reta.

Figura 45 – Peneirabilidade Caso A *versus* peneira circular

No período seco, a capacidade da peneira circular foi pouco inferior aos resultados de peneirabilidade obtidos no laboratório. Já no período chuvoso, as curvas se inverteram, com os resultados da peneira industrial mostrando capacidades específicas mais altas, se comparados aos resultados obtidos em laboratório.

Cabe destacar que a peneira industrial tem movimento circular, enquanto a infinita tem movimento linear. O movimento linear impulsiona as partículas em determinada direção, normalmente a 45°, sempre para a frente. Já o movimento circular impulsiona as partículas em várias direções, gerando velocidades distintas e até mesmo algum freio em momentos pontuais. Assim, a capacidade de uma peneira com movimento linear tende a ser superior a uma peneira de movimento circular, caso os outros parâmetros do equipamento sejam os mesmos.

Isso é válido quando o minério apresenta características de fluxo livre, i.e., quando praticamente não ocorre o efeito da cimentação entre partículas ou a aderência do minério às telas de peneiramento.

Já no período chuvoso, a situação muda radicalmente. O efeito da cimentação entre partículas e a aderência do minério às telas devido à umidade começam a ter

influência no peneiramento. Neste caso, o movimento circular passa a ser vantajoso, pois as partículas recebem impulsos em várias direções e diminuem a probabilidade de aderência às telas.

A peneirabilidade obtida na peneira industrial em 10% de umidade foi praticamente duas vezes superior quando comparada ao resultado dos ensaios na PCI, respectivamente 27 t/h/m² e 14 t/h/m². Essa diferença pode ser explicada pelo baixo desempenho do movimento linear quando o minério está sob forte influência da umidade.

7.1.2 Comparação da Peneira de Laboratório contra Peneira Banana

No mesmo prédio onde estava instalada a peneira de movimento circular, também foi instalada uma peneira de movimento linear, com perfil banana. Essa peneira foi colocada em uma posição paralela à circular, de forma que ambas recebessem a mesma alimentação.

A peneira banana possui a mesma largura e o mesmo comprimento em pés (8'x20') da peneira circular, resultando praticamente na mesma área de peneiramento. Uma primeira inspeção foi realizada seguindo a metodologia anterior. A primeira inspeção ocorreu no período seco, quando o minério atingiu umidades próximas a 6% e a vazão média de alimentação da peneira foi de 1300 t/h.

A capacidade específica real no período seco foi então calculada dividindo-se a vazão horária de alimentação pela área de peneiramento, o que resultou em uma peneirabilidade de 88,8 t/h/m². Já no período úmido, com umidade em torno de 10%, a vazão de alimentação média foi reduzida a apenas 250 t/h, o que resultou em uma peneirabilidade de 17,1 t/h/m².

Diferentemente do observado no caso da peneira circular, as inspeções na peneira banana indicaram que, para umidades baixas, a peneirabilidade foi ligeiramente superior aos resultados obtidos na PCI. A peneirabilidade industrial para 6% de umidade foi calculada em 89 t/h/m², enquanto no laboratório o valor obtido foi 75 t/h/m², conforme apresentado na Figura 46.

Figura 46 – Peneirabilidade Caso A *versus* peneira banana

A alta capacidade específica da peneira banana nos períodos secos pode ser explicada pela alta velocidade de transporte do minério no início do deque, que possui uma inclinação bastante intensa a 25°. A velocidade alta do minério proporciona rápida estratificação e acelerada passagem dos finos, deixando o restante do corpo da peneira com menos carga e permitindo assim alcançar capacidades mais elevadas.

Embora os resultados tenham sido melhores em condições secas, no período chuvoso foi observado que o desempenho da peneira banana foi bastante impactado. Com minério mais úmido, as partículas grudavam facilmente umas às outras e caminhavam juntas até o final do deque.

A capacidade instantânea precisou ser reduzida drasticamente para evitar que grandes blocos de minério pastoso, contendo um misto de partículas grossas e finas, fossem reportados ao *oversize*.

O movimento linear na peneira industrial não se mostrou eficaz em atenuar o efeito da aderência em comparação ao movimento circular no período chuvoso. A peneirabilidade medida na peneira industrial ficou muito próxima ao resultado obtido no laboratório.

7.1.3 Comparação da Peneira de Laboratório contra Peneira Elíptica

Um terceiro modelo de peneira foi instalado em posição paralela às outras duas peneiras industriais anteriormente analisadas. Esse terceiro modelo também apresentava perfil banana, porém com movimento elíptico.

Além da diferença no movimento, outro diferencial dessa peneira era sua alta aceleração, pois o exemplar foi concebido para operar em condições mais severas. Enquanto as outras peneiras operavam na faixa de 4,5 G, a peneira elíptica operava na faixa de 5,5 G. As dimensões da peneira foram as mesmas, 8' por 20', com uma área total de peneiramento de 14,6 m².

Inspeções foram novamente conduzidas nos períodos seco e chuvoso. No período seco, a vazão de alimentação média da peneira foi de 1400 t/h. A capacidade específica no período seco foi então calculada dividindo a vazão horária de alimentação pela área de peneiramento, o que resultou em uma peneirabilidade de 102,5 t/h/m².

Esse foi o maior valor de peneirabilidade industrial registrado entre todos os modelos de peneiras inspecionados. Provavelmente a peneirabilidade seria muito semelhante ao resultado encontrado na inspeção da peneira banana convencional de 89 t/h/m², pois os perfis dos quadros são muito semelhantes e a peneira elíptica lança o material em uma direção bastante parecida, predominantemente em 45°. Contudo, a peneira elíptica tem maior aceleração 5,5 G, outro importante fator que se atribui para o aumento de sua capacidade.

Figura 47 – Peneirabilidade Caso A versus peneira elíptica

A outra inspeção ocorrida no período úmido, com umidades próximas a 10%, mostrou uma vazão de alimentação média na peneira elíptica de 750 t/h, que resultou em uma peneirabilidade de 51,2 t/h/m².

Embora a peneirabilidade tenha diminuído em relação ao período seco, observou-se que ainda esteve quase três vezes superior ao valor alcançado no ensaio de laboratório, este último de 13,9 t/h/m². Comparando-se os resultados da peneira com movimento elíptico com a peneira industrial circular (segundo melhor desempenho), foram notadas diferenças significativas. O valor de capacidade específica (27,3 t/h/m²) foi praticamente metade do resultado alcançado pela peneira elíptica (51,2 t/h/m²).

Os resultados de capacidade específica mais alta alcançados pela peneira elíptica, em ambos os períodos do ano, foram atribuídos basicamente a:

- Ø perfil banana, que proporcionou maior velocidade de transporte e mais rápida estratificação, contribuindo para o aumento de capacidade;

- Ø movimento elíptico, que proporcionou a combinação dos movimentos circular, fornecendo impulso em todas as direções das partículas, e linear, direcionando o fluxo em direção predominantemente a 45°;
- Ø maior aceleração 5,5 G, que aumentou a frequência de vibração, dificultando o efeito da aderência entre as partículas.

Os resultados das inspeções nas peneiras industriais demonstraram que os valores de peneirabilidade industrial podem ser muito diferentes entre si, dependendo do movimento adotado pela peneira, perfil do quadro, aceleração e conteúdo de umidade no minério. Todos esses fatores exercem alguma influência na peneirabilidade, porém os métodos de dimensionamento atuais, dentre o principal o baseado na equação da Allis-Chalmers, ainda não foram suficientemente validados.

O método de cálculo da Allis-Chalmers apresentou resultados considerados razoáveis para a peneira banana, pois o tipo de movimento na PCI também é linear. Para as peneiras circular e elíptica os resultados da PCI foram bastante diferentes, mostrando que ainda são necessários alguns ajustes no modelo para melhor precisão dos resultados.

8 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado nesta dissertação 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.

Para isso foi criada uma peneira vibratória de movimento linear em escala de laboratório, chamada de Peneira Circular Infinita (PCI), que possui formato de rosca e permite a circulação de determinada quantidade de amostra na própria peneira, por um período ilimitado. A PCI é capaz de simular peneiramentos em grandes comprimentos, semelhantes a processos conduzidos em larga escala.

Os sete minérios selecionados para a realização dos ensaios 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.

Os resultados de peneirabilidade obtidos nos ensaios realizados na PCI foram analisados e comparados entre si. Em seguida, esses mesmos resultados foram comparados à peneirabilidade calculada pelo método empírico mais tradicional de dimensionamento e seleção de peneiras vibratórias empregados atualmente na indústria mineral, o método da Allis-Chalmers.

Por último, o resultado da peneirabilidade obtido em um ensaio específico, denominado Caso A, também foi utilizado para uma comparação preliminar com os resultados obtidos a partir da operação de três peneiras industriais operando em uma usina de grande porte no Brasil, processando o mesmo tipo de minério.

Os ensaios do subgrupo formado por minérios de ferro típicos mostraram que os resultados de peneirabilidade obtidos na PCI foram relativamente próximos à peneirabilidade calculada pelo método empírico da Allis-Chalmers, proporcionando uma aderência razoável entre os pontos experimentais e os calculados.

Os resultados confirmaram as observações de diversos 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.

Os ensaios do subgrupo formado por minérios de ferro atípicos mostraram que os resultados experimentais de peneirabilidade foram significativamente diferentes dos calculados pelo método da Allis-Chalmers, principalmente em umidades mais elevadas. Assim, concluiu-se que o método da Allis-Chalmers para selecionar peneiras industriais não deve ser aplicado em casos de minérios de ferro atípicos. A seleção de peneiras deve basear-se em algum método físico de dimensionamento, como o apresentado neste trabalho.

Os resultados de peneirabilidade obtidos nos ensaios do subgrupo formado por bauxita foram os que apresentaram os maiores desvios em relação aos calculados pelo método da Allis-Chalmers. O valor da umidade crítica encontrada no ensaio na PCI, por exemplo, foi muito superior à previsão feita pelo método. Não há atualmente nenhum método empírico de dimensionamento de peneiras confiável para bauxita com elevada umidade natural. Portanto, concluiu-se ser fundamental a realização de ensaios, como os apresentados com a PCI, que proporcione uma estimativa mais assertiva do processo em grande escala.

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. O método de comparação foi considerar como referência o peneiramento na PCI e, a partir deste, associar diferenças obtidas no desempenho de peneiras industriais a alguns parâmetros, como tipo de movimento, inclinação do deque, bem como aceleração do movimento.

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. Enquanto o movimento linear, característico da PCI, proporcionou uma peneirabilidade mais alta para o minério com baixa umidade, a peneira industrial de movimento circular proporcionou maior peneirabilidade quando o minério contava com umidade elevada. Atribui-se o melhor desempenho da peneira industrial de movimento circular em condições mais

úmidas aos impulsos às partículas em todas as direções proporcionados pelo próprio movimento circular, minimizando a aderência das partículas às telas.

Foi realizada também uma comparação direta entre a peneirabilidade obtida no Caso A e a obtida em peneira industrial de movimento linear com perfil banana. Esse comparativo indicou que o perfil do quadro também exerce influência acentuada no desempenho do peneiramento. Os valores de peneirabilidade, tanto no laboratório quanto na peneira industrial tipo banana, seguiram trajetórias muito semelhantes. Contudo, a peneirabilidade obtida na peneira industrial esteve sempre em um patamar superior à registrada na PCI. Esse fato foi atribuído ao seu perfil de inclinação variável, que proporciona maior capacidade em relação ao peneiramento horizontal.

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. Atribui-se o melhor desempenho à maior aceleração empregada na peneira elíptica. 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.

Embora apresentasse resultados consistentes, a comparação industrial conduzida neste trabalho é preliminar e demanda uma quantidade significativa de novos estudos até que se obtenha uma validação do método físico aqui desenvolvido.

O método descrito neste trabalho é considerado extremamente útil em fases iniciais de empreendimentos minerais, quando há pouca informação sobre o minério a ser peneirado e disponibilidade escassa de amostras. Também é importante em trabalhos de otimização de processos, principalmente quando ocorre uma variação

nas propriedades do minério, ou mesmo diante da necessidade de realizar ajustes em algum parâmetro de peneiramento existente.

Como exemplo, é bastante comum a demanda em circuitos industriais de beneficiamento de minérios por uma redução no tamanho da abertura do peneiramento ou no tipo de tela. O método aqui apresentado permite estimar a nova peneirabilidade de forma simples e rápida e, conseqüentemente, as possíveis limitações de equipamentos existentes ante as novas condições de operação estipuladas.

9 RECOMENDAÇÕES

Durante o desenvolvimento deste trabalho, várias ideias surgiram visando melhorar a previsibilidade da peneirabilidade obtida nos ensaios utilizando a PCI. Essas ideias são expostas neste capítulo no sentido de orientar outros pesquisadores na condução de novas investigações sobre o tema.

A habilidade do método em prever o desempenho de peneiras em larga escala se mostrou bastante promissora, pois é possível configurar a PCI de diversas formas, seja variando sua aceleração dentro da faixa usual na indústria, seja utilizando diferentes tipos de tela e aberturas. Todavia, o método ainda apresenta algumas limitações que precisam ser mais bem investigadas, dentre as quais destacam-se:

Peneira tipo banana (inclinação variável) e peneiras de múltiplos decks

A peneira circular infinita (PCI) foi desenhada basicamente para modelar peneiras de um só deque e em posição horizontal. Enquanto essa configuração é ideal para investigar os fundamentos do peneiramento, esse tipo de peneira não representa uma proporção muito significativa nas grandes e modernas instalações industriais, que geralmente incluem nessas funções peneiras com inclinação variável e peneiras com dois ou três deques.

Um protótipo de peneira semi-industrial com perfil banana e três deques foi desenhado pelos engenheiros da Metso e instalado no laboratório da empresa em Sorocaba (SP). Um dos objetivos é verificar o efeito da inclinação variável na peneirabilidade ao longo dos deques. Os resultados obtidos nesse protótipo poderão,

eventualmente, ser correlacionados aos dados obtidos na PCI para determinação dos respectivos parâmetros de *scale-up*.

Tipo de movimento – circular, linear e elíptico

A PCI possui movimento vibratório linear, o que dificulta a previsibilidade do peneiramento para outros tipos de movimentos. A posição do deque horizontal limita a utilização de movimento circular. O movimento elíptico até poderia ser aplicado, porém o mecanismo para gerar a elipse é mais complexo e de instalação engenhosa. No entanto, o protótipo semi-industrial desenhado na Metso, além do perfil banana, permite seu funcionamento com movimentos distintos, do linear ao elíptico. Assim, seus resultados também poderão ser correlacionados aos dados obtidos na PCI para determinação dos parâmetros de *scale-up*.

Uma recomendação adicional consiste em se utilizar métodos numéricos, como o DEM (Discrete Element Method) combinados com métodos CFD (Computational Fluid Dynamics), que simulam processos físicos de escoamento, para modelagem dos resultados obtidos com a PCI, sobretudo no que se refere à umidade e os respectivos efeitos na eficiência de peneiramento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BEERKIRCHER, G. Banana screen technology. **In: KAWATRA, S. K. (Ed.). Comminution practices**. Littleton: SME, 1997. P. 37-40.

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

_____. **Crushing and grinding calculations**. Selection Circuits to Prepare Beneficiation Feeds. Allis Chalmers Bulletin, May 1983.

CHAVES, A. P. **Britagem, peneiramento e moagem**: teoria e prática do tratamento de minérios. 4. ed. São Paulo: Signus, 2009. v. 3.

_____. **Classificação**: teoria e prática do tratamento de minérios. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. v. 1.

CLEARY, P.W. **DEM as a tool for design and optimization of mineral processing equipment**. Proc. XXII IMPC, 2003. P. 1648-1657.

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

DELBONI JR., H. **Modelagem e simulação de circuitos de cominuição e classificação**. Apostila do curso. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

FAÇO. **Manual de britagem da Faço**. São Paulo: Allis Mineral Systems, 1994.

FIGUEIRA, V. F.; ALMEIDA, S. L. M.; PEREIRA NETO, J. **Cominuição**: tratamento de minérios. CETEM/CNPQ: Rio de Janeiro, 1995. p. 105-205.

FOREMAN, W. E. Sizing. **In: LEONARD III, J. W. (Ed.). Coal preparation**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1991.

GALLERY, R. Separação por tamanho. In: VALADÃO, George Eduardo Sales; ARAÚJO, Armando Corrêa (Orgs.). **Introdução ao tratamento de minérios**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2007.

GAUDIN, A. M. **Principles of mineral dressing**. New York: McGraw-Hill, 1939.

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

KARRA, V.K. Development of a model for predicting the screening performance of a vibrating screen. **CIM Bull**, 72, p. 167-171, 1979.

KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. **Introduction to mineral processing**. New York: Wiley, 1982. 491 p.

KINGSFORD, G. R. The evaluation of a non-blinding screen for screening iron ore fines, **Proc. 4th Mill Operators Conf.** p. 25-29.

KRAUSE, M. Horizontal versus inclined screens, **Quarry**, p. 26-27, mar. 2005.

LYNCH, A. J. **Mineral crushing and grinding circuits**: their simulation, optimization, design and control. New York: Elsevier, 1977. 342 p.

_____; MORRELL, S. **The understanding of comminution and classification and its practical application in plant design and operation**: comminution: theory and practice. Littleton: SME, 1992. cap. 30, p. 405-425.

MEINEL, A. Classification of fine, medium-sized and coarse particles on shaking screens, **Aufbereitungs Technik**, 37 (7), 1998.

_____. The fundamentals of classifying difficult-to-screen materials. **Aufbereitungs Technik**, 1999.

_____. Sizing difficult-to-screen bulk materials – fundamental considerations. **AufbereitungsTechnik**, 42 (7) p. 315-326, June 2001.

MELLOR. S. H. **An introduction to crushing and screening**. Nottingham: The Institute of Quarrying, 1990.

METSO-MINERALS. **Basics in minerals processing**. USA, 2002.

_____. **Manual de britagem**. 5. ed. Sorocaba: Metso Mineral, 2005.

MOGENSEN, F. A new screening method of screening granular materials. **The Quarry Managers' Journal**, p. 409-414. Oct., 1965.

MOON, D. **Understanding screen dynamics for optimum efficiency**, Institute of Quarrying Southern Africa 34thConference and Exhibition, Mar. 2003.

NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Mineral comminution circuits**: their operation and optimization. JKMS: Queensland, 1996. 413 p.

OGAWA, R. **Reducing mining environmental impact – through innovative vibrating screen technology**, Sustainable Mining Conference, Kalgoorlie, WA, Aug. 2010, p. 86-99

OLSEN, P.; COMBE A. Is screening a science or art? **Quarry**, 11(8), p. 20-25, Aug. 2003.

PRASHER, C. L. **Crushing and grinding process handbook**. 1. ed. New York: Wiley, 1987. 474 p.

PRITCHARD, A. N. **Linear motion versus circular motion on vibrating screens, in Proceedings Coal and Mineral Sizing**. The Illawarra Branch of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1984.

RITTINGER, R. P. **Textbook of mineral dressing**. Berlim: Ernst and Korn, 1867.

TAGGART, A. F. **Elements of ore dressing**. 2. ed. New York: Wiley, 1951. v. 1. cap. 22, p. 388-433.

VIBRATING SCREENS: Application and technical data standards. Milwaukee: Construction Industry Association (CIMA), 1998.

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

YELL, A; DU TOIT, B. **An investigation into the effects of screen panel selection on dense medium circuits.** 9th International DMS Symposium. DMS Powders, Paarl, South Africa, 2005.