ANDREIA CAROLINA ROSA

**Método para estimativa do consumo específico de energia de
itabiritos em moinhos de remoagem a seco**

SÃO PAULO
2019

ANDREIA CAROLINA ROSA

**Método para estimativa do consumo específico de energia de
itabiritos em moinhos de remoagem a seco**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Ciências

SÃO PAULO
2019

ANDREIA CAROLINA ROSA

**Método para estimativa do consumo específico de energia de
itabiritos em moinhos de remoagem a seco**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Engenharia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Junior

SÃO PAULO
2019

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

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

São Paulo, 26 de junho de 2019

Assinatura do autor: Andreia Rosa

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Rosa, Andreia Carolina

Método para estimativa do consumo específico de energia de itabiritos em moinhos de remoagem a seco / A. C. Rosa -- versão corr. -- São Paulo, 2019.

126 p.

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

1.moagem a seco 2.remoagem 3.ensaios de moagem 4.minério de ferro
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

Às bravas mulheres que se aventuram neste mundo machista da mineração.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve muitas idas e vindas, e muitas pessoas estiveram envolvidas, o que torna fácil cometer injustiças aqui. Começo, portanto, agradecendo a todos que em algum momento colaboraram, seja na Samarco, seja na Gerdau, na Vale ou na Poli. Em especial, relembro:

A empresa Vale, por me disponibilizar as amostras, as análises e os dados industriais que aqui utilizo.

Meu orientador, Homero Delboni Jr., pela paciência e pelo aprendizado.

Jatobá, Wellington, Victor, Rodrigo e professor Maurício, pelo apoio com os ensaios no moinho de torque, entre outras amolações...

Ahmed, Raney, Saud, Nabil, Abdulrazaq e demais da equipe do laboratório físico da unidade de pelotização de Omã, pelas amostragens, pelos ensaios, pelas análises e discussões.

Thiago, Rossana, Jonathan e Michelle, pelo apoio com as amostragens em Carajás e em Tubarão e pelas análises realizadas no laboratório de Alegria.

Gil e André, pelas consultorias em estatística.

Joaquim Donda, Carlos Magno, José Pedro e Junia Rocha, pelas discussões e pelo apoio em todas as fases deste trabalho.

RESUMO

A importância dos circuitos de moagem nos setores de mineração, pelotização e cimenteiro – seja por determinar o desempenho de processos subsequentes, seja por sua significativa parcela nos custos operacionais – encorajou o desenvolvimento de extensivos estudos na área. Dois campos continuam, contudo, pouco explorados: a moagem a seco e a moagem fina de concentrados (ou remoagem).

Por outro lado, os circuitos de cominuição têm ganhado gradativamente mais importância ao longo dos anos para o mercado de minério de ferro, devido ao aprofundamento das cavas em operação e, por consequência, ao tratamento de minérios mais compactos e com menores teores de ferro. Por si só, essas novas características geraram a necessidade de moer produtos cada vez mais finos e de etapas adicionais de concentração e pelotização. Nesse ínterim, a moagem fina ganhou extrema importância.

Este trabalho se concentrou no desenvolvimento de um método de ensaio de laboratório para a previsão do consumo específico de energia na etapa de remoagem a seco, adequado à aplicação em minérios de ferro itabiríticos. Foram investigadas diversas variáveis que podem interferir nos resultados de laboratório e definidas as melhores condições para os ensaios. Em seguida, os resultados dos ensaios foram confrontados com dados de uma operação de remoagem a seco industrial.

O método proposto apresentou boa aproximação com os resultados industriais em relação à geração de finos (porcentagem passante em 45 μm). Em relação à geração de área superficial – parâmetro importante para a pelotização –, os desvios foram maiores devido à sua correlação com a composição mineralógica para as misturas investigadas. Contudo, a relação entre a geração de área superficial com as diferentes mineralogias para o minério de ferro, especialmente o de Carajás, demanda maiores investigações.

A relação linear proposta por Rittinger entre a geração de superfície e o consumo específico de energia na moagem também pode ser comprovada para a moagem a seco.

Palavras-chave: moagem a seco, remoagem, ensaios de moagem.

ABSTRACT

Studies on grinding area are vast due to its importance for mining, pelletizing and cement industry: grinding operations define both the throughput of following processes and operational costs. However, there are two grinding processes that lack deeper understanding: dry and fine grinding (re-grinding).

On the other hand, as rich iron ore deposits get depleted and the necessity of treating more complex ores increases, the necessity of re-grinding concentrates prior further steps of concentration grows. Therefore, fine grinding of iron ores is progressively gaining importance.

This study focused on the development of a bench scale test to predict the specific energy consumption of dry re-grinding circuits for iron ore. The variables that can affect grinding tests results were evaluated and the best conditions were defined. In sequence, the results of a series of lab tests were compared with data from an industrial circuit.

The proposed test presented good correlation with industrial results regarding the generation of fines (percentage passing 0.045 mm). Regarding new surface generation – parameter of great importance for ore pelletizing – the differences between lab and industrial results were bigger, due the correlation of this parameter with the mineralogical composition of the samples investigated. However, the correlation between surface generation and mineralogical composition for iron ores, especially ores from Carajás complex, demands deeper investigations.

Moreover, the linear relationship between energy consumption and surface area generation, as proposed by Rittinger was also observed for dry grinding.

Key words: dry grinding, re-grinding, lab tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito convencional de moagem a seco.....	19
Figura 2 – Separador estático.	20
Figura 3 – Separador dinâmico.	21
Figura 4 – Princípio de funcionamento do separador dinâmico.....	22
Figura 5 - Representação do caixilho para delimitação de amostra em transportador de correia.	48
Figura 6 - Amostragem de fluxos contínuos.....	49
Figura 7 - Circuito de moagem da Vale Omã.	56
Figura 8 – Moinhos de duplo compartimento com câmara de secagem..	58
Figura 9 – Esquema dos moinhos da usina de Omã.....	58
Figura 10 – Detalhes dos revestimentos da câmara de moagem	58
Figura 11 – Histogramas para granulometrias típicas dos materiais PFPT e IOCJ...60	
Figura 12 - Exemplos de composições mineralógicas para os materiais PFPT e IOCJ.	60
Figura 13 – Teores de Fe e contaminantes típicos para o PFPT.	61
Figura 14 – Teores de Fe e contaminantes típicos para o IOCJ.	62
Figura 15 – Fluxograma para o plano inicial de ensaios deste trabalho.....	63
Figura 16 – Princípio de funcionamento do peneirador aerodinâmico.	65
Figura 17 – Fluxograma para os ensaios controlando-se o <i>top size</i> das amostras...74	
Figura 18 – Fluxograma dos ensaios de sensibilidade à alimentação.	75
Figura 19 – Pontos de amostragem no circuito industrial de Omã.....	77
Figura 20 – Fluxograma de composição das amostras referentes ao circuito industrial de Omã.	77
Figura 21 – Pontos de coleta dos incrementos nos alimentadores dos moinhos industriais.	78
Figura 22 – Fluxograma de composição das amostras para os ensaios no moinho de torque.	79
Figura 23 – Amostradores automáticos usados nos terminais marítimos.	79
Figura 24 – Comparação do parâmetro k de laboratório e industrial para os ensaios a úmido.	81

Figura 25 - Comparação do parâmetro BSA/kWh/t de laboratório e industrial para os ensaios a úmido.	81
Figura 26 – Comparação do parâmetro k de laboratório após aplicação do fator de correção para moagem a seco x industrial.....	82
Figura 27 - Comparação do parâmetro BSA/kWh/t de laboratório após aplicação do fator de correção para moagem a seco x industrial.....	82
Figura 28 - Ensaio de laboratório a úmido x dados industriais descontando-se a potência na câmara de secagem – parâmetro k.	84
Figura 29 - Ensaio de laboratório a úmido x dados industriais descontando-se a potência na câmara de secagem – parâmetro BSA/kWh/t.....	85
Figura 30 – Comparação entre parâmetro k de laboratório e industrial (sem energia na câmara de secagem).....	86
Figura 31 - Comparação entre parâmetro BSA/kWh/t de laboratório e industrial (sem energia na câmara de secagem).....	86
Figura 32 - Taxas de quebra para diferentes composições de cargas de bolas..	88
Figura 33 - Parâmetro k x carga de bolas.	89
Figura 34 - Parâmetro BSA/kWh/t x carga de bolas.....	89
Figura 35 - Parâmetro k x massa amostra/volume vazios da carga.....	90
Figura 36 - Parâmetro BSA/kWh/t x massa amostra/volume vazios da carga..	91
Figura 37 – Consumo de energia medido no moinho de torque x calculado.....	92
Figura 38 - Gráfico de pareto para a resposta superfície específica.	94
Figura 39 - Gráfico de pareto para a resposta percentagem passante em 45 µm. ...	94
Figura 40 – Gráfico de superfície de controle para o parâmetro superfície específica.	96
Figura 41 – Gráfico de superfície de controle para o parâmetro percentagem passante na malha de 45 µm.....	97
Figura 42 – Ensaio de validação: comparação do parâmetro k.....	99
Figura 43 - Ensaio de validação: comparação do parâmetro BSA/kWh/t.	100
Figura 44 - Ensaio de validação: comparação do parâmetro percentagem passante em 45 µm.	101
Figura 45 - Ensaio de validação: comparação da superfície específica.	102
Figura 46 - Comparação entre as distribuições de dados industriais e de laboratório para o parâmetro percentagem passante na malha de 45 µm no produto do moinho	104

Figura 47 - Comparação entre os desvios padrão dos dados industriais e de laboratório para a superfície específica no produto do moinho.....	104
Figura 48 - Comparação entre variância dos dados industriais e de laboratório para o parâmetro percentagem passante em 45 µm na alimentação do moinho.....	105
Figura 49 - Comparação entre a variância dos dados industriais e de laboratório para a superfície específica na alimentação do moinho.....	106
Figura 50 – Médias diárias para parâmetros industriais dos moinhos durante o mesmo período dos ensaios de validação.	107
Figura 51 – Diferenças entre dados de laboratório e industriais antes e depois de alteração nas amostragens - percentagem passante em 45 µm.....	108
Figura 52 – Diferenças entre dados de laboratório e industriais antes e depois de alteração nas amostragens - Superfície específica.....	108
Figura 53 - Distribuições granulométricas das amostras compostas para o teste de sensibilidade à granulometria de alimentação dos ensaios.	111
Figura 54 - Relação entre a granulometria de alimentação dos ensaios e a do produto.	111
Figura 55 - Relação entre a granulometria de alimentação dos ensaios e a superfície específica no produto.	112
Figura 56 – Fotos da amostra original para os ensaios de sensibilidade dividida por faixas granulométricas.	113
Figura 57 – Distribuição dos tipos de hematita por amostra.	114
Figura 58 - Resultados dos ensaios de laboratório x participação de IOCJ.	115
Figura 59 – Relação linear entre superfície específica e consumo específico de energia.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de equipamentos usados na moagem a seco	16
Tabela 2 – Operação dos classificadores dinâmicos	22
Tabela 3 – Grupos de equipamentos para a moagem fina	24
Tabela 4 – Condições do ensaio de Holderbank.....	32
Tabela 5 – Condições do ensaio do Midland Research Center	33
Tabela 6 – Condições dos ensaios de moagem Donda	34
Tabela 7 – Relação amostra/vazios para alguns ensaios de moagem disponíveis no mercado	38
Tabela 8 – Valores de k segundo Rowland e Kjos	39
Tabela 9 – Distribuições para cargas de bolas em equilíbrio	40
Tabela 10 – Exemplo de distribuições granulométricas dos materiais IOCJ e PFPT	59
Tabela 11 – Parâmetros para o cálculo da energia na câmara de secagem	67
Tabela 12 – Condições dos ensaios para a avaliação do <i>top size</i> da amostra x carga	69
Tabela 13 – Massa de amostra utilizada em cada ensaio.....	69
Tabela 14 – Programa de ensaios no moinho de torque.....	70
Tabela 15 – Condições padronizadas para os ensaios com moinho de torque	70
Tabela 16 – Plano de ensaios para o projeto de experimentos.....	71
Tabela 17 – Condições dos ensaios de moagem realizados durante o período de validação	72
Tabela 18 – Resultados dos ensaios de moagem a úmido.....	80
Tabela 19 – Comparação dos dados industriais, descontando-se a energia na câmara de secagem com os ensaios de laboratório a úmido	84
Tabela 20 – Taxas de quebra por faixa granulométrica para diferentes composições de cargas de bolas	88
Tabela 21 – Ensaios exploratórios variando a carga de bolas	89
Tabela 22 – Resultados dos ensaios variando a massa de amostra	90
Tabela 23 – Resultados dos ensaios com moinho de torque	92
Tabela 24 - Dados industriais relativos à amostra coletada para o projeto de experimentos.....	93
Tabela 25 – Resultados dos ensaios do projeto de experimentos	93

Tabela 26 – Simulações de resultados de laboratório.....	97
Tabela 27 – Condições definidas para os ensaios a seco	98
Tabela 28 – Parâmetros k e BSA/kWh/t para os ensaios de validação.....	99
Tabela 29 – Porcentagem passante em 45 µm e superfície específica no produto do moinho para os ensaios de validação	101
Tabela 30 – Ensaios escalpando-se a alimentação – porcentagem passante em 45 µm	109
Tabela 31 – Ensaios escalpando-se a alimentação – superfície específica.....	110

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	10
2	REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1	MOAGEM A SECO	12
2.2	MOAGEM FINA.....	23
2.3	ASPECTOS RELEVANTES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE LABORATÓRIO	36
2.4	AMOSTRAGEM	44
2.5	PROJETO DE EXPERIMENTOS FATORIAL	51
2.6	CIRCUITO DE MOAGEM ESTUDADO NESTE TRABALHO.....	55
3	MATERIAIS E MÉTODOS	63
3.1	PLANO GERAL DE TRABALHO.....	63
3.2	ENSAIOS A ÚMIDO – MÉTODO DONDA	64
3.3	ENSAIOS PARA A AVALIAÇÃO DE VARIÁVEIS RELEVANTES AO MÉTODO DE LABORATÓRIO	67
3.4	VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO DE ROWLAND.....	70
3.5	PROJETO DE EXPERIMENTOS	71
3.6	MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES ESCOLHIDAS	72
3.7	AMOSTRAGENS	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1	ENSAIOS EXPLORATÓRIOS – MÉTODO DE DONDA	80
4.2	ENSAIOS PARA A INVESTIGAÇÃO DAS VARIÁVEIS RELEVANTES AO ENSAIO DE LABORATÓRIO	87
4.3	PROJETO DE EXPERIMENTOS	92
4.4	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	98
5	CONCLUSÕES.....	116
	REFERÊNCIAS.....	117

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O estudo de circuitos de moagem tem sido uma constante ao longo da história do beneficiamento de minérios. Entre as razões para tanto, destaca-se a importância desse processo nas usinas de beneficiamento, seja para se obter a liberação necessária ao ótimo desempenho das etapas posteriores de concentração, seja para adequar a granulometria de produtos e subprodutos ao transporte e/ou processamentos subsequentes. Nas usinas de pelotização de minério de ferro, a moagem também tem o papel fundamental de adequar a matéria-prima às características granulométricas necessárias para garantir a qualidade física das pelotas.

Independentemente da aplicação, a moagem é, em geral, responsável por uma parcela significativa dos custos operacionais de qualquer planta: nas usinas de pelotização, por exemplo, a despeito das operações de queima – que representam um grande consumo de energia térmica –, a etapa de moagem pode ser responsável por até 30% dos custos operacionais variáveis.

Esse contexto justifica os múltiplos trabalhos encontrados na literatura visando à seleção, ao dimensionamento e à manutenção de um circuito de moagem o mais eficiente possível. O correto dimensionamento e o controle operacional adequado do circuito de moagem podem representar uma economia significativa em custos de investimentos e operacionais, seja pela simplificação de circuito, seja pela redução de insumos e peças para a manutenção. Em um cenário de instabilidade dos preços de *commodities*, a redução de custos de investimentos é, em particular, uma condição crítica para a sobrevivência de novos e tradicionais participantes no mercado de minério de ferro e para a viabilização de projetos de tratamento de minérios de baixo teor.

Por outro lado, aos poucos os circuitos de cominuição ganharam mais importância ao longo dos anos para o mercado de minério de ferro devido ao processamento de minérios com menores teores e mais compactos. Por si só, essas novas características geraram a necessidade de moer produtos cada vez mais finos em etapas adicionais de concentração. Nesse ínterim, a moagem fina ganhou extrema importância.

Entretanto, a previsão do comportamento da moagem fina, especialmente a realizada em moinhos de bolas, ainda não é bem estabelecida. São poucos os estudos disponíveis na literatura, e os métodos apresentados não estão consolidados no mercado. Quando a moagem é realizada a seco, as fontes são ainda mais escassas, normalmente restritas às aplicações para a indústria de cimento.

Em relação à previsão do consumo específico de energia na moagem – parâmetro universalmente aceito com um dos principais pontos de controle de um circuito industrial –, embora as ferramentas disponíveis no mercado tenham evoluído, especialmente no que concerne ao campo da simulação computacional, os ensaios de moagem do tipo *jar test* ainda são muito utilizados como referência por constituírem um instrumento simples, rápido e de fácil acesso a operadores.

Desse modo, como objetivo principal, este trabalho se propôs a desenvolver um método de ensaio de laboratório para a previsão do consumo específico de energia na etapa de remoagem a seco que seja adequado à aplicação em minérios de ferro itabiríticos. Como objetivos específicos, investigaram-se os parâmetros dos ensaios de laboratório relevantes para a previsão do consumo de energia industrial de circuitos de moagem de bolas a seco. Além disso, avaliou-se a aplicação da equação de Rowland – que afirma a existência de uma relação linear entre a geração de área superficial de partículas e a energia específica aplicada na moagem – na moagem de bolas a seco.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A moagem é uma operação de grande importância estratégica e econômica nas indústrias de beneficiamento mineral, de pelotização e cimenteira, entre outras. Como se trata de um tema amplamente discutido na literatura especializada sob diversos enfoques, julgou-se desnecessário repeti-los aqui.

Desse modo, o enfoque deste capítulo se deve a dois aspectos particulares no campo da moagem e especialmente relevantes para este trabalho: a moagem a seco e a moagem fina de concentrados (remoagem).

2.1 MOAGEM A SECO

A moagem pode ser realizada tanto a úmido quanto a seco. Na moagem a úmido, o material é tratado sob a forma de uma polpa, com concentração de sólidos aproximada de 40% em volume. Por outro lado, na moagem a seco, a umidade do material deve estar abaixo de 1% em peso.¹

KANDA et al.² resumem as vantagens da moagem a úmido sobre a moagem a seco:

- menor consumo específico de energia;
- maior capacidade de processamento;
- menor emissão de poeira;
- menor emissão de ruído;
- aditivos (se necessários) são mais facilmente adicionados e dispersados.

Por outro lado, algumas das desvantagens seriam:

- maior desgaste de bolas e revestimentos;
- menor produção de ultrafinos;
- a operação de secagem é mais fácil e produz menor quantidade de poeira se realizada antes da moagem, ou seja, caso o processo subsequente exija a retirada de água do material, pode ser vantajoso utilizar a moagem a seco.

Pryor³ e Taggart⁴ enumeram algumas razões para a escolha da moagem a seco em vez da moagem a úmido:

- quando o produto só requer cominuição (e não concentração, cujos processos normalmente são realizados a úmido);
- quando há reação química do material tratado com água;
- quando há escassez de água na região;
- quando o processo subsequente demanda um produto seco ou com distribuição de finos, característica da moagem a seco;
- quando as características do material tratado, tais como abrasividade, tendência de empacotamento ou aderência nos revestimentos, demandam um processo a seco;
- quando os custos de operação, manutenção ou instalação do circuito de moagem justificam o uso de moagem a seco.

A moagem a seco costuma ser considerada menos eficiente do que a moagem a úmido: estima-se que o consumo específico de energia na moagem a seco seja entre 10-40% superior.¹⁻⁵ Contudo, como lembra Taggart,⁴ o consumo de bolas e revestimentos na moagem a seco tende a ser menor (até 70%). Portanto, os custos totais de ambas as operações tendem a se aproximar, deixando a escolha entre seco x úmido mais ligada às características do produto, à eficiência dos equipamentos auxiliares e às demandas de operações subsequentes. Além disso, Taggart⁴ ressalta que, com o advento dos moinhos tipo *air-swept* e dos classificadores a ar de alta eficiência, a diferença se estreitou ainda mais, e operações que eram comumente feitas a úmido (como em cimenteiras) passaram a ser feitas a seco, com redução de custos ou com a obtenção de produtos, cujas características são mais favoráveis aos processos subsequentes.

Os mecanismos da moagem a úmido e a seco são muito semelhantes, mas, na operação da moagem a seco, alguns aspectos são particulares.^(3,4) Os fatores operacionais mais relevantes na moagem a seco são discutidos a seguir.

Fluxo de material através do moinho:

O material seco é mais resistente ao movimento, dada sua maior fricção interna, que resulta em maior ângulo de repouso. Essa condição gera a necessidade

operacional de garantir o fluxo de material através do moinho, seja por meio do *design* do equipamento, seja provocando um grande diferencial de pressão através dele. Também é importante que haja um fluxo de ar suficiente e contínuo para garantir que a transferência de umidade não seja interrompida. Por consequência, é mais fácil “sobrecarregar” um moinho a seco (acúmulo forçado de material dentro da carga de bolas) do que um moinho a úmido.

O fluxo de ar por gravidade pode ser alcançado aumentando-se a relação comprimento/diâmetro do moinho e por seu sistema de descarga. O diferencial de pressão através do moinho é obtido com o uso de ventiladores em sua alimentação e descarga (*air-sweeping*). Contudo, esse sistema tem a desvantagem de retirar os ultrafinos, que ajudam a lubrificar a carga interna do moinho.

Amortecimento da carga:

Quando há excessiva quantidade de finos no interior da carga de bolas, a energia neles aplicada é usada apenas para redistribuí-los, sem que ocorra cominuição de fato. Para reduzir esse efeito, é necessário garantir o fluxo de material através do moinho, a fim de impedir o acúmulo de finos nos interstícios da carga e controlar a carga circulante do circuito. O mecanismo de *air-sweeping* ajuda a reduzir esse efeito. Fuerstenau e Sullivan⁶ afirmam que, à medida que o amortecimento da carga aumenta, o índice de moabilidade da moagem a seco é alterado, ou seja, a eficiência da moagem a seco diminui conforme a quantidade de finos dentro da carga aumenta.

Cobertura dos corpos moedores (*coating*):

Na moagem a seco, é comum a deposição de finos na superfície das bolas, reduzindo o impacto da carga sobre o material. O mecanismo de *air-sweeping* e o uso de aditivos químicos podem reduzir o problema. Segundo Bond e Agthe,⁷ a formação do *coating* marca o tamanho máximo para a cominuição. O tamanho de partícula associado à formação do *coating* depende das características do material. Normalmente, materiais mais macios sofrem *coating* em granulometrias mais grosseiras. Embora o *coating* não aconteça apenas por causa da umidade, a presença de água pode agravar o processo.

Carga de bolas:

A porcentagem de enchimento deve ser menor na moagem a seco do que naquela a úmido, pois, devido à maior fricção interna da carga, sua elevação também é maior. Para evitar que a carga faça o movimento de catarata, a velocidade de rotação do moinho também deve ser menor.

Resposta à presença de umidade na alimentação nova do circuito:

O controle da umidade em todo o circuito é de vital importância na moagem a seco. A umidade afeta a moagem, a aderência, o amortecimento e o movimento da carga, a mobilidade e a classificação dos finos. Mesmo que a cominuição não cesse, a umidade afetará negativamente o consumo de energia e a capacidade do equipamento. As perdas de produtividade podem chegar a 30%.

Alguns equipamentos lidam melhor do que outros com a umidade, e a quantidade de umidade tolerada também depende do material tratado: normalmente, os moinhos de bolas são os equipamentos que menos toleram umidade. De modo geral, a umidade na alimentação do moinho não deve ultrapassar a faixa entre 0,5 a 1,5% em peso. Por outro lado, moinhos com sistema de *air-swept* podem tolerar umidades mais altas.

A pré-secagem da alimentação do moinho costuma ser necessária e pode ser feita das seguintes maneiras:

- em um secador rotativo, operando em série com o moinho;
- no próprio moinho, soprando-se gases quentes, com varredura parcial ou total de ar (*air-sweeping mills*);
- em um moinho combinado com secador, sendo este o primeiro compartimento do tambor.

Tendência de “golfamento”:

O golfamento corresponde à descarga repentina de grande quantidade de material do moinho, aumentando a granulometria de seu produto e causando distúrbios operacionais, tais como a parada forçada de elevadores de caneco por sobrecarga e entupimento de transportadores. O golfamento é evitado com mais eficácia quando se mantém a alimentação constante do moinho e com um controle cuidadoso tanto da carga circulante do circuito quanto da umidade em sua alimentação nova.

Temperatura interna do moinho:

O ar no interior do moinho ganha calor devido à fricção da carga. O controle da temperatura interna do moinho é importante para evitar que as características do material sejam alteradas e que ocorra o fenômeno de *ball coating*. Além disso, a temperatura de descarga do material deve ser controlada para evitar danos em equipamentos de transporte e despoeiramento. Caso necessário, o resfriamento do moinho pode ser feito com o uso de aditivos ou pelo jateamento de água em sua descarga.

A moagem a seco pode ser realizada em uma série de equipamentos. Taggart⁴ propõe uma classificação para os principais tipos utilizados, aqui apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de equipamentos usados na moagem a seco

Variável	Classe I	Classe II	Classe III
Velocidade de rotação	Baixa	Média	Alta
Moagem por	Atrição, compressão, impacto	Compressão, atrito	Impacto, atrição, abrasão
Moinhos	Tubulares, de panela	De rolos, de atrição	De martelos, de discos, <i>jet mills</i>
Indicados para materiais	Duros, abrasivos, friáveis	Duros ou medianos, não abrasivos, friáveis	Friáveis ou duros não abrasivos, fibrosos
Vantagens	Baixa manutenção, contaminação mínima, fácil operação	Baixo consumo de energia, pequeno espaço para instalação	Baixo custo de investimento, baixo consumo de energia, pequeno espaço para instalação
Desvantagens	Alto custo de instalação, alto consumo de energia, necessidade de grande área para instalação	Alta manutenção com materiais abrasivos	Manutenção excessiva com materiais duros e requer longo tempo

Fonte: Taggart (1945).

Os moinhos tubulares são os mais usados na moagem a seco porque são robustos, de manutenção relativamente simples e de fácil operação. Por outro lado, os moinhos verticais de rolos e as prensas de rolos se destacam para materiais macios e de abrasividade baixa, dado seu menor consumo específico de energia. Ademais, com o desenvolvimento de revestimentos resistentes à abrasão, esses equipamentos têm ganhado grande espaço especialmente na indústria cimenteira.⁸

Os moinhos verticais de rolos modernos oferecem ainda a vantagem de possuírem separadores a ar acoplados em seu interior, o que torna a instalação mais simples. Além disso, podem receber alimentações com umidades muito superiores às dos moinhos de bolas, chegando até 18% em alguns casos.⁹

Benzer, Jankovic e Ergun¹⁰ também mencionam o uso dos moinhos verticais de rolos e das prensas de rolos em uma etapa de “pré-moagem”, em conjunto com moinhos de bolas, com o propósito de diminuir o consumo de energia total do circuito: economias de até 17% são reportadas com o uso de moinhos verticais de rolos e 20% com o uso de prensa de rolos.

Por outro lado, estudos internos, realizados pela Vale, demonstraram que não é possível produzir a granulometria adequada para a pelletização em um único passe na prensa de rolos (HPGR). Nas unidades de pelletização da Vale em Porto Tubarão e nas antigas unidades da Samarco, são relatados ganhos de cerca de 300 cm²/g após uma passagem pela prensa de rolos. Levando-se em conta que o concentrado de minério de ferro não remoído apresenta superfície específica^a média de 450 cm²/g, o produto de um único passe pela prensa teria, portanto, superfície específica de 750 cm²/g, muito distante dos 1800 cm²/g requeridos para a boa qualidade da pelota (conforme será discutido mais adiante).

Diante dessa dificuldade, Athayde, Mayerhofer e Peres¹¹ propõem um circuito com diversas prensas em série, com quatro estágios de moagem. Os autores reportam ganhos no consumo específico de energia na etapa de remoagem de concentrados de minério de ferro para pelletização e maior compactação da pelota produzida com o concentrado remoído dessa forma, em comparação com o circuito em moinho de bolas a úmido. Contudo, o controle da granulometria do produto desse novo circuito proposto ainda é um desafio. Desse modo, em circuitos de pelletização, o uso mais comum da prensa ocorre após a etapa de filtragem, como forma de aumentar a área específica do concentrado já remoído a úmido, cuja granulometria deve ser controlada para não dificultar a operação de filtragem em si.

Quanto aos moinhos de bolas utilizados em moagem a seco, é comum dividir o cilindro em dois ou mais compartimentos para assegurar a granulometria do produto, especialmente na moagem das matérias-primas usadas na composição do cimento.

^a Na indústria de pelotas de minério de ferro, o método mais comum para a medição da superfície específica de partículas é pelo permeâmetro Blaine. Desse modo, neste trabalho o termo “superfície específica” refere-se sempre a medições feitas por esse equipamento.

Os compartimentos são separados por diafragmas – cuja função é reter os corpos moedores dentro de cada câmara – e *scoops*, que transportam o material entre os compartimentos através dos diafragmas. Cada compartimento possui revestimentos e *top size* de bolas diferente.^{3,8} Conforme exposto antes, um dos compartimentos pode ser utilizado para a secagem do material, ou a secagem da alimentação pode ser feita separadamente.

Quando o moinho é multicompartimentado, é comum que os revestimentos sejam definidos em cada câmara de acordo com a granulometria e o *top size* da carga moedora predominante naquela área. Os primeiros compartimentos tendem a receber uma alimentação mais grosseira do que os subsequentes e, portanto, são dotados de revestimentos do tipo levantadores para promover maior movimento da carga de bolas e predominância de quebra por impacto. O segundo compartimento, se existir, geralmente possui um perfil de revestimento que prioriza o menor levantamento das bolas e a maior quebra por abrasão. Por sua vez, o último compartimento normalmente possui revestimentos similares ao segundo ou revestimentos do tipo classificadores, cuja função é “transportar” os novos corpos moedores ao longo do comprimento do moinho (da região de descarga, onde os corpos moedores são alimentados, para a região onde o material é alimentado).¹⁰

2.1.1 Circuitos de moagem a seco

Conforme mencionado anteriormente, as instalações modernas de moagem a seco costumam utilizar classificadores a ar. Um circuito típico para moinhos de bolas é apresentado na figura a seguir.

Figura 1 - Circuito convencional de moagem a seco. (Fonte: adaptado de www.nsiequipments.com/ball-mills).

Como mostra a Figura 1, no circuito convencional de moagem de bolas o transporte da descarga do moinho aos classificadores é feito com elevadores de caneco. Nos moinhos do tipo *air-swept*, todo o transporte é feito por corrente de ar que, realizada por ventiladores, dispensa o uso dos elevadores. Circuitos com moinhos do tipo *air-swept* também podem utilizar classificadores a ar do tipo estático e/ou dinâmico, tal como mostrado na Figura 1. A principal diferença entre os circuitos é o meio de transporte do material. Os moinhos do tipo *air-swept* oferecem a clara vantagem de simplificar o circuito e eliminar os elevadores de caneco, equipamentos conhecidamente instáveis às flutuações naturais de operação. Contudo, os ventiladores necessários para promover todo o transporte por corrente de ar devem ser potentes e, portanto, podem representar um aumento significativo de energia, de até 4 kWh/t, processada em alguns casos.⁹

O principal papel dos classificadores a ar é garantir que os finos não se acumulem nos interstícios da carga, evitando os fenômenos de amortecimento e *ball coating*. O funcionamento dos classificadores a ar parte do princípio de que as partículas finas serão carregadas por uma corrente de ar, enquanto as grosseiras não serão coletadas por essa corrente e serão descartadas. A fração fina, coletada pelo ar, deve ser separada dele posteriormente. Portanto, duas operações distintas devem ocorrer: a separação das frações fina e grossa e o despoeiramento da corrente de ar que contém as partículas finas. Os classificadores podem ser estáticos ou dinâmicos.

O separador estático utiliza apenas a ação da corrente de ar para promover a separação das partículas. Os separadores dinâmicos, por sua vez, possuem um “elemento de rejeição” mecânico para as partículas grosseiras, normalmente ligado a um rotor, conforme será explicado mais adiante.¹²

Os separadores estáticos podem ser do tipo ciclones ou *grit separators*. O funcionamento dos ciclones a ar é o mesmo dos hidrociclones. A Figura 2 mostra um *grit separator*.

Figura 2 – Separador estático. (Fonte: adaptado de www.thecementgrindingoffice.com)

Os *grit separators*¹³ são usados principalmente para remover partículas grosseiras do circuito, uma vez que sua eficiência para a classificação de partículas finas é baixa. Normalmente são utilizados em conjunto com os separadores dinâmicos. Conforme mostra a Figura 2, a alimentação é feita na parte inferior do equipamento, e o diâmetro de corte é controlado pela posição das aletas. Se as aletas estiverem em posição radial, as partículas grosseiras serão precipitadas para o cone de rejeitos apenas por sua inércia, pois sua massa não permite que elas sigam a deflexão de 90° imposta pelas aletas. Se as aletas estiverem arranjadas em posição tangencial ao cone do equipamento, será criado um vórtex de ar dentro do cone e, nesse caso, além da inércia, a separação também sofrerá a influência da força centrífuga. À medida que o ângulo de posição das aletas cresce, a velocidade

tangencial das partículas também aumenta, e o diâmetro de corte diminui. Contudo, com ângulos superiores a 60° , as partículas começam a se chocar contra as aletas e perdem velocidade tangencial, o que eleva o diâmetro de corte.

Os separadores dinâmicos são classificados em “gerações” correspondentes a modificações em seu projeto, focadas no aumento da eficiência de classificação. Essas modificações ocorreram graças à busca por melhorias na distribuição do material na alimentação do equipamento, na eficiência de ajuste da corrente de ar que promove a separação, na eficiência do “despoeiramento”, ou seja, na fase de separação dos finos da corrente de ar e na facilidade de ajuste do diâmetro de corte.

Os mais modernos separadores a ar estão em sua terceira geração. Um exemplo de classificador de terceira geração é ilustrado na Figura 3: a alimentação de material é feita no topo do equipamento e cai sobre um disco giratório. O disco tem a função de garantir distribuição uniforme no equipamento. Sob ele há um rotor em forma de gaiola. O ar, por sua vez, é alimentado tangencialmente ao disco, criando um vortex na parte cônica do equipamento. Na alimentação de ar, aletas ajustáveis regulam o fluxo de ar. A classificação se dá pela resultante de forças na partícula:

- centrífuga: imposta pelo disco giratório (“elemento de rejeição” de partículas);
- de arraste: devido à corrente de ar;
- de gravidade.

A Figura 4 ilustra o princípio de separação.

Figura 3 – Separador dinâmico. (Fonte: adaptado de www.thecementgrindingoffice.com)

Figura 4 – Princípio de funcionamento do separador dinâmico. Fonte: adaptado de www.thecementgrindingoffice.com

As partículas grosseiras não passam pelo rotor e são rejeitadas na base do equipamento; as partículas finas entram pela gaiola e saem pelo cone central. O rotor tem velocidade variável. Aumentando-se sua velocidade, um número maior de partículas é rejeitado e o diâmetro de corte é reduzido. Por outro lado, aumentando-se o fluxo de ar, seja pelo ajuste do ventilador, seja pela posição das aletas, as forças de arraste para o centro da gaiola aumentam e o produto fica mais grosso. A coleta da fração fina no ar pode ser feita diretamente por um filtro de mangas ou em ciclones, como no equipamento mostrado na Figura 1. A Tabela 2 resume os parâmetros operacionais dos separadores dinâmicos.

Tabela 2 – Operação dos classificadores dinâmicos	
Parâmetro	Influência no diâmetro de corte
Velocidade de rotação	+ produto mais fino - produto mais grosseiro
Ângulo das aletas na alimentação de ar	Posição radial – produto mais grosseiro Posição tangencial – produto mais fino
Válvula de alimentação do ar	- aberta – produto mais grosseiro - fechada – produto mais fino

Fonte: Holderbank cement seminar (1986).

O conjunto de forças torna a classificação nos separadores de terceira geração equipamentos muito eficientes: a maneira como o material é alimentado no separador e o fluxo horizontal de ar que passa por ele resultam em uma separação uniforme ao longo do equipamento. Além disso, as aletas do rotor auxiliam na rejeição de partículas grosseiras.^(9,13)

2.2 MOAGEM FINA

Por se tratar de uma operação dispendiosa, que depende tanto das características do material tratado quanto das características necessárias ao produto, a cominuição normalmente é feita em diversas etapas em série. Vários tipos de equipamentos podem ser utilizados. É comum classificar as diversas etapas de acordo com a granulometria do produto desejado.¹⁴

A moagem fina/ultrafina pode ser definida como o estágio final de cominuição, cujo produto está abaixo de 100 μm .¹⁵ Na verdade, os limites para o produto dessa etapa variam segundo cada autor, mas há concordância na literatura especializada de que:⁽¹⁵⁻¹⁷⁾

- a resistência à quebra aumenta à medida que o tamanho da partícula diminui;
- eventualmente se atingirá um limite para a moagem, constituído pelo ponto em que a relação entre energia aplicada x geração de finos se torna assintótica. Há várias explicações na literatura, tais como a remoção de falhas internas das partículas à medida que sofrem redução de tamanho, a aglomeração e a agregação de partículas no interior do moinho e a ocorrência de reações químicas;
- devido à existência desse “limite físico”, nessa faixa de moagem a relação entre tamanho de partícula e consumo específico de energia é quase assintótica; por consequência, pequenas alterações na especificação do produto podem levar a grandes mudanças no consumo específico de energia;
- à medida que o tamanho da partícula diminui, forças de compactação começam a ocorrer até que as partículas passem a sofrer deformação plástica. Esse fenômeno depende tanto das características do material quanto das condições de moagem. De todo modo, a formação de agregados e aglomerados durante a moagem diminui sua eficiência.

Diversos equipamentos foram desenvolvidos para a moagem fina. Segundo Yokoyama e Inoue¹⁸ e Wellenkamp¹⁵, eles podem ser classificados em grupos, de acordo com o tipo de “esforço” (ação para a quebra das partículas) predominante. A Tabela 3 resume os tipos de equipamentos.

Tabela 3 – Grupos de equipamentos para a moagem fina

Grupo	Equipamentos	Forças predominantes				Ambiente
		Pressão	Arraste	Impacto	Choque	
Moinhos com meio moedor	Cilíndricos		x	x		Seco/úmido
	Vibratórios		x	x		Seco/úmido
	Planetários	x	x			Seco/úmido
	De atrição		x			Úmido
Moinhos de choque com rotor	Universais				x	Seco
	De Pinos					
	De rotor					
Moinhos de choque a jato	Oval				x	Seco
	Espiral					
	Contra fluxo					
Moinhos de rolos verticais		x	x			Seco
Moinhos de rolos de alta pressão		x				Seco

Fonte: Wellenkamp (1999).

Apesar da aparente gama ampla de equipamentos disponíveis, alguns dos moinhos apresentados na Tabela 3 possuem capacidade bastante limitada (poucas dezenas de toneladas por hora, como os moinhos vibratórios), operam somente em bateladas ou são restritos a aplicações laboratoriais, como os moinhos planetários. Por essas razões, na indústria de minerais metálicos e de cimento predominam os moinhos de bolas (tubulares), de atrição e os de rolos.

Os moinhos de bolas são os equipamentos de moagem mais tradicionais e amplamente empregados em diversos circuitos. Porém, parece ser consenso entre diversos autores que a operação de moagem fina em moinhos de bolas é limitada.

Orumwense e Forssberg¹⁶ afirmam que moinhos de bolas são adequados para a moagem até a granulometria de 10 μm e, para produtos mais finos, são economicamente inviáveis. Também destacam que os moinhos de bola, e particularmente os moinhos a seco, favorecem a formação de aglomerados porque disponibilizam excesso de energia ao material. Por outro lado, a formação de agregados pode ser diminuída retirando-se rapidamente os finos do moinho (< 5 μm) ou utilizando-se agentes dispersivos.

Wellenkamp¹⁵ afirma que, para a moagem ultrafina, o desempenho dos moinhos de bolas é limitado porque as condições de esforço aplicadas ao material não são adequadas para esse tipo de moagem. Normalmente, os corpos moedores de

pequeno diâmetro são aplicados para aumentar esses esforços, mas não produzem a quantidade de energia requerida para promover altas taxas de quebra de partículas finas.

Yokoyama e Inoue¹⁸ afirmam que as taxas de quebra dos moinhos de bolas são limitadas porque os corpos moedores são agitados apenas pela força gravitacional da carga cadente, enquanto outros equipamentos oferecem mais mecanismos para a agitação das bolas. Contudo, lembram que, devido à sua simplicidade, os moinhos de bolas ainda são preferidos em muitos projetos.

Lichter e Davey¹⁷ afirmam que, para a moagem fina/ultrafina a seco, os moinhos de bolas são mais empregados. Para a moagem a úmido, os de atrição, particularmente os *stirred mills* (atrição com alta velocidade), ganharam espaço, pois proporcionam redução no consumo específico de energia.

Os *stirred mills* são equipamentos especialmente desenvolvidos para moagem fina e ultrafina. Normalmente são compostos por uma parte cilíndrica, onde ficam os corpos moedores, e por um agitador ligado a um eixo central, responsável pelo movimento dos corpos moedores. O agitador pode apresentar diferentes formas e proporciona velocidades de rotação aos corpos moedores bastante superiores às observadas nos moinhos de bolas.¹⁹ A carcaça pode ser horizontal ou vertical.

Vários autores¹⁹⁻²⁵ relatam redução no consumo específico de energia e/ou no consumo de corpos moedores com o uso de *stirred mills* em substituição ou em paralelo aos moinhos de bolas, nas faixas de operação de moagem fina e ultrafina. Os ganhos relatados no consumo específico de energia variam entre 10-50%. A limitação do uso desses equipamentos – especialmente na indústria de minério de ferro – parece estar ligada à sua capacidade relativamente baixa em comparação com os moinhos de bolas.

Por outro lado, o desenvolvimento das prensas de rolos e dos moinhos de rolos verticais, especialmente no que concerne ao desgaste dos revestimentos, também desenvolveu possibilidades de novos circuitos de moagem fina, que apostam em maior eficiência energética em comparação com os moinhos de bolas.²⁵

Entretanto, como lembram Lichter e Davey¹⁷ e Yokoyama e Inoue,¹⁸ a seleção de moinhos para a moagem fina deve levar em conta, primeiramente, a definição das características necessárias no produto, pois cada tecnologia apresentará um tipo diferente de cominuição e, portanto, a curva granulométrica e a área superficial geradas serão diferentes. Ao se projetarem circuitos de moagem fina, ensaios em

escala de laboratório e piloto devem levar esse fato em consideração. As características da alimentação também exercem grande influência na escolha do equipamento, tais como tenacidade e abrasividade do minério.

Na indústria mineral, a aplicação mais comum para a moagem fina é a remoagem de pré-concentrados ou da carga circulante de circuitos de flotação, que precisam de um estágio extra de concentração para atingir as especificações de mercado. Com o esgotamento de jazidas de alto teor e a consequente necessidade de tratamento de minérios com teores cada vez mais baixos, essa aplicação tem se tornado muito recorrente.

Na indústria de minério de ferro, o esgotamento de jazidas de alto teor também levou ao aproveitamento dos finos de minério outrora descartados, devido à grande disponibilidade de minério granulado de alto teor. O aproveitamento dos “finos” levou ao desenvolvimento de operações de aglomeração para torná-los adequados às etapas de redução subsequentes, notadamente a sinterização e a pelletização.^{26,27}

A moagem fina para a preparação de concentrados para a pelletização possui extrema influência na qualidade das pelotas: a pelletização requer uma estreita faixa de qualidade para o produto da moagem, o que geralmente deve ser feito em circuitos fechados. A etapa de moagem se torna ainda mais importante quando é usado um *blend* de minérios com diferentes características. A qualidade da pelota é diretamente ligada à área superficial e à presença de partículas grosseiras na alimentação do disco. Normalmente, a qualidade da pelota verde aumenta à proporção da presença de finos na alimentação. Por outro lado, a presença de material acima de 0,210 mm é prejudicial tanto para a formação da pelota crua quanto para a qualidade da pelota queimada.

Sastry, Panigraphy e Fuerstenau²⁸ apresentaram a relação entre a formação da pelota verde, a distribuição granulométrica e a área superficial das partículas na alimentação dos discos de pelletização. Os autores também observaram diferenças no diâmetro final das pelotas quando o mesmo material é previamente moído a seco ou a úmido.

Em pelletizações costuma-se usar como referência o parâmetro Blaine para a área superficial específica do minério. Trata-se de uma medida indireta da área superficial das partículas, baseada na teoria de que o fluxo de ar através de uma amostra compactada do material mantém relação com sua área superficial.⁶ Para a boa formação da pelota crua, é necessário que a alimentação do disco possua

superfície específica entre 1400-1600 cm²/g, para minérios magnetíticos, e entre 1600-1800 cm²/g, para minérios hematíticos; para minérios hidratados, um mínimo de 2200 cm²/g é requerido.²⁶ Além da qualidade da pelota, a garantia de uma superfície específica adequada à alimentação da pelotização, também influi na economia de insumos. Pal et al.²⁹ relacionam a superfície específica da hematita moída com a resistência à compressão e com a porosidade das pelotas queimadas. Forsmo, Samskog e Bjorkman³⁰ observaram que a distribuição granulométrica na alimentação dos discos está ligada à dosagem de água e de aglomerantes necessários para o controle da plasticidade da pelota verde.

Portanto, a preparação da matéria-prima na etapa de moagem é de fundamental importância e deve ser bem controlada para a garantia operacional das etapas posteriores de aglomeração e queima das pelotas.

2.2.1 Previsão do consumo de energia na moagem fina

Na moagem fina, há basicamente duas maneiras de avaliar a geração de finos: pelo aumento da proporção de material passante em determinada malha de controle ou pelo aumento da área superficial do material moído. Em ambos os casos, é importante relacionar a geração de finos ao consumo de energia para garantir o controle operacional da etapa.

As três tradicionais “leis de energia” da cominuição, propostas por Bond, Kick e Rittinger, relacionam a geração de finos ou de área superficial ao consumo específico de energia:

- a) Rittinger afirmou que a energia necessária à cominuição é proporcional à nova área de superfície gerada nas partículas:

$$E = k \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

E = energia consumida por unidade de massa alimentada no circuito;

D_2 e D_1 = respectivamente, diâmetros do produto e da alimentação do circuito, em geral tomados como a porcentagem passante na malha de controle do circuito;

k = constante que define a proporcionalidade entre o consumo específico de energia e o diâmetro das partículas.

- b) Kick afirmou que a energia é proporcional à relação de redução entre alimentação e produto:

$$E = k \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: E , k , D_2 e D_1 têm as mesmas definições anteriores.

- c) Bond também relaciona o consumo de energia ao tamanho das partículas segundo a equação:

$$E = 10Wi \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo o parâmetro *Work Index* (Wi) definido como a energia necessária para reduzir o material a partir de um tamanho teórico infinito até um D_{80} de 100 μm .

O trabalho de Bond foi complementado por Rowland,³¹ que propôs uma série de fatores de correção para o cálculo da energia específica para circuitos e condições distintas das estipuladas por Bond, a saber, moinhos de oito pés de diâmetro, operando a úmido e em circuito fechado – para moinhos de bolas –, e em circuito aberto – para moinhos de barras. São oito fatores no total, dentre os quais se destaca, para este trabalho, o de “ineficiência” para a moagem a seco de 30%, ou seja, segundo Rowland, a moagem a seco consome em média 30% a mais de energia se comparada com a moagem a úmido.

A “lei” de Rittinger é comumente a mais aceita para a moagem fina.^{32,33,34,35,36} Donda³⁵ e Rabelo et al.³⁶ demonstraram a aplicabilidade desse método a dados industriais de minério de ferro até o limite de superfície específica de 3000 cm^2/g .

Por outro lado, o método mais tradicional para a previsão do consumo de energia em moinhos de bolas é o proposto por Bond. Normalmente, o W_i é obtido por meio de um ensaio de laboratório,³⁷ realizado a seco, que simula um circuito de moagem fechado com carga circulante de 250%. O *Work Index* se tornou uma referência quanto à moabilidade, devido ao seu enfoque prático e à sua extensa base de dados. Na literatura, também há diversas variações da metodologia de Bond, adotadas tanto sob o viés da simplificação do ensaio quanto sob aquele da sua adaptação a condições específicas. Porém, não há consenso na literatura especializada sobre a aplicação do método de Bond à moagem fina.

Rowland¹ afirma que o ensaio de Bond não é adequado quando a razão de redução for inferior a 6:1 – o que é pertinente à maioria das aplicações de moagem fina. Nesse caso, recomenda utilizar uma malha inferior à da aplicação industrial (para garantir a razão de redução mínima) ou a aplicação de um ensaio de remoagem “especial”.

Bakker³⁸ alega que o ensaio de Bond é válido para P_{80} até 75 micrômetros; para produtos mais finos, o ensaio de Levin (que será abordado mais adiante) é mais empregado.

Segundo Doll e Barrat,³⁹ o ensaio de Bond é o único teste comercial que se aplica à moagem fina: as principais “filosofias” voltadas ao dimensionamento de circuitos de moagem disponíveis no mercado (Millpower 2000, JKSimet e CEET2) utilizam o W_i de Bond ou variações dele na calibração seus modelos para a moagem fina. A metodologia SMC aplica uma fórmula de conversão ao W_i para criar um parâmetro adequado à calibração de seu modelo.

Por outro lado, Mosher e Bigg⁴⁰ consideram que o método de Bond e mesmo os fatores de correção propostos por Rowland não são aplicáveis à moagem fina e recomendam a realização de ensaios-piloto.

Como alternativa às “leis da cominuição”, utilizam-se modelos matemáticos, porém, mesmo nesses casos, a previsão do consumo de energia na moagem deve utilizar como base a caracterização do minério estudado por meio de algum ensaio de laboratório ou piloto. Os modelos baseados em balanços populacionais, por exemplo, usam como base “taxas de quebra” do material, definidas com ensaios de quebra individuais de partículas, como os ensaios DWT e SMC. No entanto, esses ensaios utilizam amostras na faixa granulométrica entre 63 e 12 mm – no caso do ensaio DWT –, e na malha mínima de 16 mm – no caso do ensaio SMC.⁴¹ Em comparação com as

faixas de operação normalmente aplicadas à moagem fina, estas são classes de partículas muito grosseiras.

Contudo, ensaios de laboratório para a previsão do consumo específico na moagem fina/ultrafina ainda não são triviais. Há poucas referências na literatura especializada e, conforme destacado por Bakker,³⁸ não há formulas padronizadas para a avaliação dessa etapa, como existem para a moagem primária ou para a moagem semiautógena.

Mosher e Bigg⁴⁰ lembram alguns aspectos particulares que dificultam a realização de ensaios para a moagem fina. Em primeiro lugar, os corpos moedores utilizados nos ensaios devem ter o mesmo diâmetro dos empregados nos moinhos industriais, pois a distribuição granulométrica da carga de bolas influi na eficiência do circuito e na curva granulométrica do produto. Adicionalmente, uma vez que o produto de circuitos de moagem fina muitas vezes ultrapassa o limite inferior das peneiras comerciais, deve-se atentar para o método de análise granulométrica utilizado nos ensaios e sempre comparar resultados a partir da mesma base de análise. Outro ponto é que o P_{80} normalmente não é a malha mais adequada para a avaliação de circuitos nessa faixa de moagem.

Além disso, quando o objetivo do ensaio é medir a geração de área superficial específica, a escolha do método de análise se traduz em dificuldade, uma vez que não há métodos diretos de medição da área de superfície de materiais finos nem consenso sobre qual o melhor método para a medição indireta desse parâmetro. Por fim, deve-se levar em conta que as características da alimentação de circuitos de remoagem são muito dependentes das operações anteriores de moagem e concentração.

Lichter e Davey¹⁷ também destacam que a definição do tamanho do produto em moagem fina não é comum: normalmente, o P_{80} não é suficiente para a moagem fina, que costuma trabalhar com faixas bem estreitas de especificação para o produto, devido aos requerimentos dos processos subsequentes.

Na próxima seção serão discutidos alguns ensaios desenvolvidos para a moagem fina.

2.2.2 Ensaio de Levin

O ensaio de Levin⁴² consiste, na prática, em uma adaptação do Wi de Bond à moagem fina.

O método segue o princípio de que, partindo-se de uma amostra de referência, coletada em um circuito industrial conhecido, é possível calcular o número necessário de revoluções por minuto no moinho de laboratório para atingir as mesmas especificações do produto industrial. Como o consumo de energia industrial é conhecido, pode-se “converter” o número de revoluções por minuto do moinho de laboratório no consumo específico de energia em laboratório. Esse índice foi denominado “energia equivalente por revolução (B)”. Ademais, supondo-se o uso de condições padronizadas nos ensaios de laboratório – como é o caso dos ensaios de Bond –, o índice B independe do material.

Desse modo, Levin utilizou a base de dados da Mintek (referente aos ensaios de Bond realizados pela empresa) para calcular o índice B. Após esse trabalho, foi estimada uma energia média de 198×10^{-7} kWh/rev.

O ensaio para a moagem fina consiste, portanto, em realizar diversas moagens nas mesmas condições do ensaio de Bond, variando-se apenas o número de revoluções por minuto, até que se atinja o produto requerido com base na malha de 0,075 mm. Contudo, as moagens são realizadas em circuito aberto, pois o autor assumiu que circuitos de remoagem são, normalmente, abertos. De posse do número de revoluções necessárias para atingir o produto especificado, calcula-se o consumo específico de energia multiplicando-se esse número pelo índice B.

O consumo de energia assim calculado representa um circuito industrial a úmido, aberto e para um moinho com diâmetro de 8 ft (2,44 m). Para condições distintas destas, são aplicáveis os mesmos fatores de correção propostos para o Wi de Bond.³¹

2.2.3 Ensaio Holderbank

O ensaio Holderbank⁴³ foi desenvolvido para prever o consumo específico de energia de moagem de cimento e, portanto, destinado à moagem fina e a seco. Há

algumas semelhanças entre as condições para as quais esse ensaio foi desenvolvido e as condições industriais estudadas neste trabalho, como:

- moagem fina, porém, com uma fração grosseira na alimentação do moinho, conforme abordado mais adiante;
- normalmente, moinhos de bolas usados em cimento são de dupla câmara, como os utilizados na usina industrial de pelotização estudada;
- moinhos de bolas da indústria de cimento costumam usar revestimentos classificadores na segunda câmara, também como aplicado na usina industrial estudada.

As condições do ensaio são descritas na Tabela 4:

Tabela 4 – Condições do ensaio de Holderbank	
Parâmetro	Condições
Dimensões moinho	0,5 x 0,5 m
Massa amostra	10 kg, britada a - 12 mm
Carga de bolas	100 kg
Rotação do moinho	37,8 rpm

Fonte: Holderbank cement seminar (2000).

O método consiste em duas etapas. Inicialmente é efetuada a moagem com uma carga composta apenas por bolas de 70 e 40 mm, nas proporções 40% e 60%, respectivamente. O moinho é, então, operado até que se atinja um produto 60% passante em 90 µm. Em seguida, a carga de bolas é substituída por cubos de 17 mm e, a cada 200-300 revoluções, o produto é analisado até que se atinjam as especificações desejadas.

O consumo específico de energia é, então, calculado pela equação:

$$E = \frac{M \times \Delta n}{59,6} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

E = consumo específico de energia (kWh/t);

M = torque do moinho, medido no eixo pinhão (Nm);

n = número de revoluções por fase do ensaio.

2.2.4 Ensaio proposto pelo Midland Research Center

Bogren e Wakeman⁴⁴ descreveram o desenvolvimento do ensaio de moagem utilizado no Midland Research Center para minérios de ferro de baixo teor da América do Norte. O ensaio foi desenvolvido em razão da dificuldade de prever o consumo específico de energia nos circuitos industriais das plantas da Hanna Mining Company, da qual o centro de pesquisas fazia parte. Até a criação do método de laboratório, a previsão era baseada apenas em ensaios piloto.

O método consiste essencialmente em construir curvas do consumo específico de energia x a área de superfície específica do produto e a granulometria (medida a partir da porcentagem passante na malha de controle). Para tanto, são efetuadas moagens em diferentes níveis de energia, que é controlada a partir de um torquímetro instalado no moinho de laboratório. A Tabela 5 resume as condições do ensaio.

Tabela 5 – Condições do ensaio do Midland Research Center

Parâmetro	Condição
Moinho	12 x 6 pol (0,3048 x 0,1524 m)
Quantidade de amostra	800 cm ³ (~ 4 kg para concentrado de minério de Fe com densidade de 5 g/cm ³)
Porcentagem de sólidos da polpa	40% v/v
Carga de bolas	18 kg, escalonada entre 1¼ a ½ pol (31,75 a 12,7 mm)

Fonte: Bogren e Wakeman (1969).

Nos estudos realizados após o estabelecimento desse método, os autores reafirmam a relação linear entre a geração de área de superfície e o consumo específico de energia, conforme proposto por Rittinger, para os minérios avaliados. Também afirmam que a relação geração de área superficial/consumo específico de energia torna-se mais favorável (ou seja, a geração de finos por unidade de energia consumida aumenta) à medida que a relação entre o volume de polpa utilizado no ensaio sobre o volume de vazios da carga de bolas diminui.

2.2.5 Ensaio “Donda” para remoagem

As características do minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero – bastante friável e com alta presença de finos naturais –, dificultam a previsão de seu comportamento na moagem, mesmo para moinhos de bolas. Nos concentradores da empresa Samarco, que sempre se destinaram ao tratamento de itabiritos de baixo teor, observou-se que os ensaios de moagem tradicionais, como o de Bond, não eram assertivos em prever o consumo específico de energia dos circuitos industriais. Com base nessa deficiência, foram desenvolvidos métodos para ensaios de bancada pela própria equipe técnica da empresa, tanto para a moagem primária quanto para a remoagem, conforme Donda, Galinari e Rabelo⁴⁵ e Donda.⁴⁶

Os ensaios para ambas as etapas seguem o mesmo método, variando apenas as condições de moagem. Consistem em moagens em tempos sucessivamente mais longos, até que se obtenha um produto com a mesma especificação do circuito industrial avaliado. A Tabela 6 resume as condições para ambos os ensaios.

Tabela 6 – Condições dos ensaios de moagem Donda

Parâmetro	Condições	
	Ensaio de moagem primária	Ensaio de remoagem
Alimentação	- 9,52 mm	- 1,00 mm
Moinho	12” x 12” (304,8 x 304,8 mm)	10” x 10” (254 x 254 mm)
Rotação	70% da velocidade crítica	65% da velocidade crítica
Carga de bolas	30,6 kg, escalonada entre 63 a 25 mm	18kg, escalonada entre 30 a 15 mm
Porcentagem de enchimento do moinho	30%	30%
% Sólidos da polpa	79%	75%
Massa de amostra por ciclo	5,0 kg (p/ densidade de sólidos de 3,8 g/cm ³)	3,5 kg (p/ densidade de sólidos de 4,95 g/cm ³)

Fontes: Donda, Galinari e Rabelo (1999) e Donda (2003).

Os tempos de moagem são convertidos em energia por meio da equação proposta por Rowland¹ para moinhos de pequeno diâmetro:

$$kWb = 6,3 \times D^{0,3} \times \text{sen} \left(51 - 22 \left(\frac{2,44 - D}{2,44} \right) \right) \times (3,2 - 3V_p) \times C_s \times \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10C_s)}} \right) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

kWb = potência (kW) por tonelada de bolas no eixo pinhão;

D = diâmetro interno do moinho (m);

V_p = fração do volume do moinho ocupada pelas bolas;

C_s = fração da velocidade crítica.

Os resultados podem ser expressos na forma de uma curva logarítmica, cuja equação é:

$$E = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{\% F}{\% P} \right) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

E = consumo específico líquido de energia específica em kWh/t;

F = massa retida de partículas na malha de interesse na alimentação do circuito;

P = massa retida de partículas na malha de interesse no produto do circuito;

k = parâmetro característico do minério para a malha de interesse, naquela condição de moagem.

Em moagem fina de *pellet feed*, conforme já discutido, a geração de área superficial também é importante para a garantia da qualidade das pelotas cruas. Portanto, além da curva anterior, é construída a curva consumo de energia x superfície específica. Ao contrário da equação descrita anteriormente, a geração de área de superfície específica possui comportamento linear. A inclinação da reta foi chamada de parâmetro BSA/kWh/t.

Donda e Rosa⁴⁷ descrevem diversos dados industriais, comprovando que o comportamento de minérios de ferro itabiríticos pode ser descrito pela equação anterior para a moagem em moinhos de bolas. Também demonstram que resultados

de ensaios industriais e em escala piloto sugerem que essa aplicação pode ser estendida a outras tecnologias de moagem, como os moinhos verticais.

Até a paralização das atividades na mina de Germano, em novembro de 2015, havia 20 moinhos de bolas e um moinho vertical em operação na unidade, dos quais 11 foram dimensionados assertivamente com base no método aqui descrito. Os ensaios de moagem e o parâmetro k também são utilizados como controle operacional dos circuitos de moagem industrial desta e de outras unidades da companhia Vale, além de estarem presentes no modelo geometalúrgico dessas empresas. Os dados industriais relativos ao moinho vertical demonstram que o mesmo método também é efetivo para o controle operacional dessa tecnologia, conforme descrevem Rosa, Oliveira e Donda.⁴⁸

2.3 ASPECTOS RELEVANTES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE LABORATÓRIO

Ao se desenvolver um método de laboratório com o objetivo de prever o consumo específico de energia de um circuito industrial complexo, tal como o aqui estudado, diversos aspectos devem ser considerados:

- a complexidade do minério tratado, que, como demonstrado em trabalhos anteriores,^{45,46,47,48} possui comportamento peculiar na moagem;
- a distribuição granulométrica bimodal da alimentação do circuito, conforme explicado no capítulo seguinte;
- a moagem fina, que foi descrita em poucas ocasiões na literatura especializada quanto à previsão do consumo de energia em laboratório;
- a moagem a seco, que também conta com poucas referências quanto à previsão do consumo específico de energia;
- os moinhos com dupla câmara, sendo que a primeira, embora consuma parte da energia aplicada ao equipamento, não se destina à moagem em si.

Devido a tantos aspectos peculiares, parece lógico afirmar que o ensaio de laboratório deve refletir ao máximo as condições industriais, mas à luz das dificuldades de realização de um ensaio dessa natureza.

No desenvolvimento de ensaios de moagem, Bond⁴⁹ recomenda alguns cuidados para que os resultados de laboratório reflitam com mais eficácia os dados de circuitos industriais:

- as dimensões do jarro de laboratório devem respeitar a mesma relação L/D dos moinhos industriais;
- quando materiais heterogêneos são tratados, cresce a importância do ensaio em circuito fechado: a fração menos dura do minério é a que costuma quebrar com maior frequência, causando, portanto, um acúmulo da fração mais dura no produto do moinho. Nos moinhos industriais, a carga circulante dilui esse efeito, mas ensaios em bateladas não conseguem reproduzir as condições industriais;
- quando os moinhos industriais possuem descarga por diafragma, o Wi operacional costuma ser cerca de 10% mais eficiente do que o previsto em laboratório.

Adicionalmente, quando Donda⁴⁶ estudou a previsão do consumo específico de energia para os minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero, foram identificadas diversas variáveis que podem influenciar os resultados de ensaios de moagem: dimensões do jarro, porcentagem de enchimento do moinho, porcentagem de velocidade crítica, porcentagem de sólidos da polpa, relação entre o volume de polpa e o volume de vazios da carga de corpo moedores, distribuição granulométrica da carga de corpo moedores, forma do corpo moedor, tipo e material do revestimento do moinho e procedimento experimental.

Algumas dessas variáveis foram avaliadas para o âmbito deste trabalho e serão discutidas a seguir.

2.3.1 Relação entre o volume de amostra e o volume de vazios da carga de corpos moedores

No desenvolvimento de seu ensaio, Donda⁴⁶ observou que a relação entre o volume de interstícios da carga de bolas e o volume de amostra é um fator importante para os resultados dos ensaios de laboratório. Conforme exposto no item 2.2.4, Bogren e Wakeman⁴⁴ corroboram essa importância em seus estudos.

Stamboliadis, Pantelaki e Petrakis⁵⁰ também avaliaram a geração de área superficial segundo a relação massa de amostra/massa de carga de bolas: nos ensaios apresentados pelos autores, à medida que essa relação diminui, aumenta a geração de área superficial por unidade de energia específica consumida.

Tendo em vista essas observações, a Tabela 7 mostra um resumo desse parâmetro para alguns ensaios disponíveis na literatura.

Tabela 7 – Relação amostra/vazios para alguns ensaios de moagem disponíveis no mercado

Ensaio	Dimensões do moinho (D x L – m)	Massa das bolas (kg)	Volume das bolas (m ³)	Volume de amostra (m ³)	Relação volume de amostra/interstícios da carga
Bond ⁴⁹	0,305 x 0,305	20	0,004	0,0007	0,41
Donda Remoagem ³⁵	0,254 x 0,254	18	0,004	0,002	1,21
Donda Moagem ³⁶	0,305 x 0,305	30,6	0,007	0,003	1,1
Holderbank ⁴³	0,5 x 0,5	100	0,021	0,005	0,58

Chama a atenção o ensaio de Bond, realizado a seco, no qual a relação volume de amostra/vazios da carga é bastante baixa. O ensaio de Holderbank, desenvolvido para cimento, também utiliza um pequeno volume de amostra em comparação com o volume da carga.

2.3.2 Composição da carga de bolas do ensaio

É de conhecimento comum na literatura especializada que o *top size* da carga de bolas deve ser escolhido de acordo com o *top size* do material a ser tratado. Portanto, essas duas variáveis devem ser estudadas em conjunto. São diversas as metodologias propostas para a escolha do diâmetro do corpo moedor mais adequado a cada aplicação.

Coghill e de Vaney (*apud* Gupta e Yan)⁵¹ propuseram a seguinte fórmula para o cálculo do *top size* da carga de bolas:

$$Db = 0,4K\sqrt{F} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

D_b = diâmetro da bola em cm;

F = granulometria da alimentação do moinho em cm;

K = constante que agrupa tanto características do minério tratado quanto variáveis operacionais do moinho; para minérios tenazes, o valor de K é 37,4, e para minérios friáveis, o valor é de 29,8.

Rowland e Kjos⁵² propuseram a seguinte equação:

$$D_b = 25,4 \left[\left(\frac{F_{80}}{k} \right)^{0,5} \left(\frac{\rho_s W_i}{100 \phi_c (3,281D)^{0,5}} \right)^{0,33} \right] \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

D_b = diâmetro da bola em mm;

F_{80} = granulometria da alimentação do moinho em micrômetros (malha correspondente a 80% passante);

Φ_c = fração da velocidade crítica do moinho;

ρ_s = densidade do material tratado;

W_i = Work Index do material tratado (kWh/t);

D = diâmetro interno do moinho em metros;

k = constante dependente da configuração do circuito, segundo a Tabela 8, para moinhos de bolas.

Tabela 8 – Valores de k segundo Rowland e Kjos

Tipo de descarga	Moagem a seco/úmido	Tipo de circuito	k
Overflow	A úmido	Aberto	350
Overflow	A úmido	Fechado	350
Diafragma	A úmido	Aberto	330
Diafragma	A úmido	Fechado	330
Diafragma	A seco	Aberto	335
Diafragma	A seco	Fechado	335

Fonte: Rowland e Kjos (1982).

Azzaroni,⁵³ por sua vez, propôs a seguinte equação:

$$Db = \frac{6,3(F80)^{0,29} (Wi)^{0,4}}{(\phi c D)^{0,25}} \quad (\text{Equação 9})$$

As mesmas definições descritas para a equação anterior se aplicam aqui.

A despeito de quaisquer teorias, porém, é sempre importante também levar em consideração as práticas industriais na escolha do melhor diâmetro para a carga de bolas. Na empresa Vale, é comum usar um critério interno, definido por:

$$Db = 20\sqrt{F90} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

F_{90} = malha correspondente a 90% passante na alimentação do circuito.

Uma vez definido o *top size*, Bond (*apud* Rowland)¹ calculou a carga de bolas em equilíbrio a partir de diversos diâmetros comerciais, como mostrado na Tabela 9. Quando a reposição de bolas é mista, ou seja, quando dois diâmetros diferentes são repostos, uma média ponderada referente às cargas em equilíbrio para os dois diâmetros é usada.

Tabela 9 – Distribuições para cargas de bolas em equilíbrio

Top size da bola (mm)	Distribuição em massa (%)							
	114	101	89	76	63,5	51	38	25,4
114	23							
101	31	23						
89	18	34	24					
76	15	21	38	31				
63,5	7	12	20,5	39	34			
51	3,8	6,5	11,5	19	43	40		
38	1,7	2,5	4,5	8	17	45	51	
25,4	0,5	1	1,5	3	6	15	49	100

Fonte: Rowland (1982)

2.3.3 Medição da área de superfície específica

A área superficial específica do *pellet feed* é um parâmetro importante para a garantia da qualidade física das pelotas e, portanto, um parâmetro de controle fundamental do circuito de remoagem para a pelotização.

Contudo, não há métodos para a medição direta da área superficial específica de partículas. Uma alternativa consiste no parâmetro Blaine, que é uma medida indireta da área superficial, muito utilizada na indústria de cimento e aceita como referência na operação de pelotizações de minério de ferro. O método consiste em medir a diferença de pressão por unidade de vazão de ar (ou fluido) através de um leito de partículas uniformemente compactado, em um cilindro de dimensões padronizadas.

O método Blaine utiliza equações semiempíricas para o cálculo da área superficial específica, envolvendo calibrações a partir de amostras de referência. Esse método semiempírico pode comprometer a reprodutibilidade dos resultados.⁵⁴

Kaye⁵⁵ enfatiza a importância da preparação da amostra dentro do cilindro para a confiabilidade dos resultados do permeâmetro Blaine e descreve como diferentes formas de aplicar pressão à amostra, durante a compactação do leito de partículas, podem levar a discrepâncias na medição da área superficial por interferirem no caminho da passagem de ar pelo material. O autor também afirma que as medições no permeâmetro sofrem uma influência significativa das alterações nas propriedades do material, tais como distribuição granulométrica, diâmetro médio ou forma das partículas.

Schulz⁵⁶ mediu a superfície específica com o parâmetro Blaine para vários concentrados de minério de ferro com diferentes porosidades no leito de amostra, que foram gradativamente reduzidas por compactação. Notou-se que os valores de superfície específica variaram fortemente e aumentaram à medida que a porosidade diminuiu. O autor também observou que a formação de agregados durante a moagem a seco afeta a medição de área superficial.

Dessa forma, o uso do parâmetro Blaine deve ater-se à comparação de amostras com características semelhantes, e os cuidados na execução dos ensaios são essenciais para não levar a resultados equivocados.

2.3.4 Influência da composição do minério na geração de área de superfície

A influência da composição mineralógica de minérios de ferro na geração de área superficial durante sua moagem já foi estudada anteriormente para a moagem a úmido.

Mourão e Stegmiller⁵⁷ avaliaram o índice BSA/kWh/t para uma série de tipologias utilizadas nas usinas de pelotização de Tubarão, que foram classificadas segundo a participação de partículas policristalinas: quanto maior a porcentagem, maior a geração de área superficial para o mesmo consumo específico de energia.

Chagas⁵⁸ construiu modelos estatísticos correlacionando a mineralogia de diversas amostras de minério de ferro do Quadrilátero – além de outros parâmetros, como densidade – com o índice BSA/kWh/t: os modelos mostraram que, dentre as amostras estudadas, a participação de hematita martítica aumenta a geração de área superficial por unidade de energia aplicada. Por outro lado, a participação de goetita, de hematita especular e de hematita granular tem efeito contrário.

Ribeiro⁵⁹ propõe uma escala para diversas tipologias de minérios de ferro da Vale, segundo a geração de área superficial por unidade de energia aplicada, que em ordem crescente seria: hematita lobular, hematita especular/lamelar, hematita granular, martita, goetita e hematita microcristalina.

Graça et al.⁶⁰ relacionam diversas morfologias para minérios de ferro, típicas do Quadrilátero Ferrífero, ao ganho de superfície específica na moagem. Os autores também classificaram as morfologias em ordem crescente de geração de superfície por unidade de energia aplicada na moagem: hematita tabular-granular, hematita tabular, hematita policristalina, martita e goetita.

Nos trabalhos relatados, não fica claro, porém, se um ensaio de laboratório é capaz de prever essa influência no comportamento do circuito industrial de moagem, especialmente na moagem a seco, um aspecto que ainda carece de investigação.

2.3.5 Energia despendida na câmara de secagem

A câmara de secagem nos moinhos de duplo compartimento pode ser comparada com um secador do tipo rotativo de tambor. No entanto, a literatura especializada sobre os secadores rotativos se concentra no cálculo da energia térmica despendida por esses equipamentos, e não no cálculo da energia elétrica necessária à sua rotação. Nos moinhos do circuito estudado, a energia térmica é fornecida à câmara por uma fonte externa ao moinho e, portanto, na câmara de secagem ocorrem trocas térmicas entre o gás previamente aquecido e o minério. Por outro lado, a câmara de secagem corresponde a uma fração da carcaça do moinho e, desse modo, a energia despendida por esse compartimento pode ser entendida como uma fração da energia total despendida para a rotação da carcaça.

Rowland¹ afirma que em moinhos com múltiplos compartimentos a potência total despendida pelo equipamento corresponde à soma da potência consumida em cada segmento. Assim, a potência relativa à câmara de secagem pode ser calculada como a de um compartimento do moinho, funcionando como um segmento autógeno (sem a ação de corpos moedores). Neste trabalho, a fim de estimar a potência referente à câmara de secagem, foi utilizada a equação proposta por Austin⁶¹ para o cálculo da potência de moinhos autógenos:

$$P_w = 10.6D^{2.5}L(1 - 1.03J)\left[(1 - \varepsilon_b)\frac{\rho_s}{W_c}J + 0.6J_b\left(\rho_b - \frac{\rho_s}{W_c}\right)\right]\Phi_c\left(1 - \frac{0.1}{2^{9-10\Phi_c}}\right) \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

D = diâmetro interno do moinho (m);

L = comprimento interno do moinho (m);

J = porcentagem de enchimento do moinho;

ε_b = porosidade da carga;

ρ_s = densidade do minério (t/m³);

W_c = porcentagem de sólidos;

J_b = porcentagem de bolas (relativo ao volume total do moinho);

ρ_b = densidade das bolas (t/m³);

Φ_c = fração da velocidade crítica.

2.4 AMOSTRAGEM^b

Nesta seção, os conceitos teóricos sobre amostragem foram tratados resumidamente. A teoria mais aceita sobre esse tema foi proposta por Pierre Gy, em 1976, cujos estudos foram revistos por Pitard,⁶² em 1993, no qual se concentrarão as próximas páginas.

Segundo Pitard, a amostragem “ideal” é aquela em que todos os fragmentos do lote a ser amostrado têm igual probabilidade de serem coletados e todos os objetos estranhos ao lote têm probabilidade zero de serem selecionados. Contudo, uma série de fatores pode perturbar a realização de uma amostragem “ideal” e comprometer a qualidade dos dados, como afirmam Nappier-Munn et al.:⁶³

- instabilidade do processo;
- características dos amostradores utilizados;
- procedimentos para a preparação das amostras;
- erros analíticos;
- precisão dos instrumentos de campo;
- propagação de erros na estimativa de quantidades, teores etc.

Desse modo, da amostragem até a análise de dados existe uma série de fatores que podem conduzir a erros, e seu melhor entendimento pode levar à minimização desses desvios.

Pitard aponta quatro princípios para o correto planejamento de uma amostragem:

- os materiais são, por natureza, heterogêneos;
- não se deve assumir que quaisquer porções do lote amostrado terão a mesma composição do lote como um todo;
- a fração do lote que está mais acessível à coleta de amostras não é, necessariamente, representativa do todo;
- para a correta amostragem, é preciso buscar a minimização dos erros de delimitação (DE), extração (EE) e preparação das amostras (PE), ou seja,

$$DE = EE = PE = 0.$$

^b Este capítulo foi apresentado na dissertação de mestrado da autora. Contudo, por se tratar de um assunto pertinente também a este trabalho, foi reproduzido com as devidas adaptações ao contexto do estudo.

Esses conceitos serão desenvolvidos com mais detalhes nos próximos parágrafos.

Mesmo em uma amostragem “perfeita”, em que todos os procedimentos para a minimização de erros de seleção e preparação de amostras foram seguidos, existem erros intrínsecos ao processo de amostragem em si e às características do lote, que não podem ser eliminados.

O primeiro deles é chamado de “erro fundamental” (FE) e está ligado às heterogeneidades do material amostrado, tais como composição química, forma, liberação e distribuição granulométrica. O FE pode ser considerado secundário quando a amostra se presta a análises químicas de elementos com altas concentrações (como é o caso do minério de ferro), mas é muito importante para a análise de elementos-traço.

O erro fundamental pode ser estimado segundo a equação:

$$\sigma^2_{(FE)} = \left(\frac{1}{M_s} - \frac{1}{M_L} \right) c l f g d^3 \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

M_s = massa da amostra;

M_L = massa do lote amostra;

d = diâmetro máximo das partículas, definido como a abertura da peneira em que fica retido, no máximo, 5% da massa total analisada.

Os demais fatores dependem das características do material amostrado:

- fator de forma das partículas (f): a equação acima considera que as partículas são cubos perfeitos. Desse modo, f é um fator corretivo que depende da forma das partículas. Segundo experimentos relatados por Pitard, para a maioria dos materiais, f pode ser assumido como 0,5;
- fator de granulometria (g), que pode ser igual a:
 - 0,25, para materiais não bitolados;
 - 0,55, para materiais bitolados, cuja faixa granulométrica se encontre, por exemplo, entre as aberturas de duas peneiras consecutivas;
 - 0,75 para materiais naturalmente bitolados, como cereais;
- fator de mineralogia (c), calculado por:

$$c = \lambda_m \frac{(1 - a_L)}{a_L} + \lambda_g(1 - a_L) \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

λ_m e λ_g = respectivamente, densidades do mineral de interesse e da ganga;
 a_L = teor do mineral de interesse no lote amostrado.

- fator de liberação (l), cujos valores podem ser:
 - 0,8 para materiais muito heterogêneos;
 - 0,4 para materiais heterogêneos;
 - 0,2 para materiais medianos;
 - 0,1 para materiais homogêneos;
 - 0,05 para materiais muito homogêneos.

Como o erro fundamental é proporcional ao diâmetro da partícula, elevado à terceira potência, quanto menor for o diâmetro máximo no lote amostrado, menor será o erro incorrido. Por essa razão, sempre que possível, devem-se planejar as operações de amostragem e cominuição da amostra minimizando o FE.

De acordo com a máxima variância pretendida, também se devem calcular previamente as massas mínimas para cada etapa de amostragem, a fim de produzir dados confiáveis.

Contudo, conforme Nappier-Munn et al.,⁶³ nem sempre a massa mínima teórica, estimada segundo a relação anterior, é prática: para materiais grosseiros, esse cálculo pode resultar em amostras de toneladas em massa, o que não é viável economicamente. Desse modo, deve-se buscar um equilíbrio entre a teoria e a praticidade de realização da amostragem.

Quando o principal objetivo da amostragem é a análise granulométrica, o FE é estimado pela equação:

$$s_{FE}^2 = \left(\frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right) f \lambda \left[\left(\frac{1}{a_{Lc}} - 2 \right) d_{FLc}^3 \right] + g d^3 \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

f, g = fatores de forma e granulometria, tal como definidos anteriormente;

λ = densidade do minério;

a_{LC} = proporção da faixa granulométrica de interesse no lote amostrado;

d_{FLC} = diâmetro médio da faixa granulométrica de interesse;

d = diâmetro máximo, tal como definido anteriormente.

O segundo tipo de erro intrínseco refere-se à segregação natural que as partículas tendem a sofrer dentro de um lote e é chamado de “erro de agrupamento” (GE). Como cada incremento coletado corresponde a um grupo de partículas, a amostra é composta não por uma série de partículas escolhidas ao acaso, e sim por grupos de partículas escolhidos ao acaso. Esses grupos trazem desvios probabilísticos em relação à amostra ideal. Para a minimização do GE, é recomendado tomar um grande número de incrementos, que devem conter a menor massa possível.

O quarteamento de amostras também pode favorecer a minimização do GE: o procedimento por pilha cônica não é adequado, pois, a partir dele, são gerados apenas dois incrementos. Por outro lado, os procedimentos de “pazada” alternada e o quarteador tipo Jones são mais assertivos.

Por fim, o erro contínuo (CE) refere-se às flutuações naturais de processo, ou seja, às variações nos fluxos amostrados.

A materialização da amostra, por sua vez, tem duas fontes de erros: a delimitação, ou seja, o estabelecimento de limites para que se proceda à coleta do incremento, e a extração do incremento. Os desvios de delimitação (DE) e extração (EE) da amostra correspondem, portanto, ao erro total da fase de obtenção da amostra.

Por fim, no erro total dos dados obtidos por amostragem, também devem ser contabilizados os desvios oriundos das operações de preparação de amostras (PE) e análises de dados (AE), embora essas operações não façam parte da amostragem em si.

Pitard aponta as etapas de delimitação e extração da amostra como as duas potenciais fontes de erros para os dados. Segundo o autor, mais do que estimar esses desvios, é preciso tomar cuidado para evitá-los. Os principais aspectos apontados pelo autor para a correção dos erros de delimitação serão apresentados a seguir.

2.4.1 Erros de delimitação dos incrementos

Materiais granulados em pilhas e em transportadores de correia:

Materiais granulados em transportadores de correia podem ser considerados um lote unidimensional, ou seja, um conjunto de lotes, cuja espessura e cuja largura são muito inferiores ao comprimento. É o caso de pilhas alongadas e materiais amostrados em transportadores de correias parados. Nesses casos, para uma delimitação adequada do incremento, devem-se utilizar dois planos simétricos e paralelos, que precisam atravessar inteiramente o lote. Contudo, para a retirada de amostras em transportadores parados, esse procedimento é válido se, além do paralelismo, os planos-limite se encaixarem perfeitamente na curvatura do tapete do transportador. A Figura 5 mostra esquematicamente esse procedimento:

Figura 5 - Representação do caixilho para delimitação de amostra em transportador de correia.
Fonte: <http://geologia.fc.ul.pt/PosGrad/EstudosCaso0708/MarianaRosaApresentacao.pdf>.

As pilhas alongadas devem ser construídas de modo que possuam largura e espessura constantes ao longo de todo o comprimento. Para a operação de homogeneização em pilha alongada em laboratório, recomenda-se o uso de pás de seção quadrada para a retirada dos incrementos.

Materiais em fluxos contínuos:

Nesses casos, os amostradores devem satisfazer duas condições: obter uma “fatia” de material com espessura constante durante toda a coleta do incremento e atravessar o fluxo por completo.

A Figura 6 ilustra esses dois princípios.

Figura 6 - Amostragem de fluxos contínuos: (A) Amostrando todo o fluxo periodicamente: 1,2,3 estão corretos; 4 e 5 incorretos. (B) Amostrando parte do fluxo continuamente – sempre incorreto. (C) Amostrando parte do fluxo periodicamente – sempre incorreto.
(Fonte: adaptado de Pitard (1993).

Para atender aos princípios ilustrados na Figura 6, os amostradores devem possuir seção retangular, ou seja, extremidades retas e paralelas entre si. Em amostradores do tipo *vezin*, que descrevem uma trajetória circular, a seção deve ser perfeitamente radial. Também é importante que os amostradores possuam largura suficiente para atravessarem todo o fluxo.

2.4.2 Erros de extração dos incrementos

Em amostragens de fluxos contínuos, é preciso garantir, além da correta delimitação do fluxo, que as partículas não sejam ricocheteadas pelas paredes do amostrador para fora do recipiente de coleta.

O desenho do amostrador deve, então, obedecer às seguintes observações:

- as extremidades devem ser perfeitamente ajustadas e simétricas;
- a largura deve ser suficiente para permitir que partículas desviadas do fluxo ainda caiam dentro dos limites do amostrador.

Por regra, Pitard recomenda que a largura do amostrador não seja inferior a três vezes a espessura do fluxo amostrado.

Também é importante observar a largura da abertura do amostrador em relação ao diâmetro da partícula amostrada. A norma NBR ISSO 3082⁶⁴ para amostragem de minérios de Fe recomenda o máximo entre:

- a abertura de três vezes o diâmetro máximo de partículas para o fluxo coletado;
- 30 mm.

Para amostragens em correia parada, a mesma norma recomenda ainda que o comprimento de correia do qual a amostra será retirada seja ao menos três vezes maior que o diâmetro da maior partícula a ser coletada.

Pitard recomenda uma abertura superior à mínima, calculada pelas equações:

$$Wo = 3d, \text{ para } d < 3 \text{ mm, ou}$$

$$Wo = 3d + 10, \text{ para } d > 3 \text{ mm} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

Wo = abertura mínima recomendada (mm);

d = diâmetro máximo de partículas para o fluxo coletado.

Pitard alerta, contudo, que essas regras não foram desenvolvidas para fluxos com grandes vazões (~ 1000 m³/h), para os quais ainda não há teorias estabelecidas. Nesses casos é importante utilizar a experiência de campo.

2.4.3 Aspectos práticos para amostragens de circuitos de moagem

Nappier-Munn et al.⁶³ fizeram um estudo sobre campanhas de amostragens, cujo objetivo é a obtenção de dados para a calibração de modelos computacionais para a simulação de circuitos de cominuição, incluindo circuitos de moagem em moinhos de bolas.

Alguns aspectos práticos e relevantes, analisados por esses autores, incluem:

a) coleta de dados industriais: devem ser coletados tantos dados quanto possível, pois a redundância de dados é importante para a verificação de eventuais erros. Dados disponíveis nos sistemas automáticos de controle da planta devem ser registrados

periodicamente, sendo a média dos registros considerada representativa do período da amostragem;

b) flutuações no processo: uma vez estabelecidas as condições operacionais visadas pelo estudo, os autores recomendam que se observe um intervalo de pelo menos uma hora antes de proceder à amostragem, o que corresponde a múltiplos do tempo de residência do moinho. Esse cuidado é uma garantia para que o circuito esteja sob operação em regime. Em outros termos, as condições operacionais devem ser o mais estáveis possível;

c) obtenção das amostras: a coleta de todas as amostras deve ser realizada simultaneamente. Se esse procedimento não for viável, deve-se proceder à coleta em uma ordem “lógica”, que respeite os tempos de residência em cada etapa. Caso ocorra uma grande perturbação no processo durante a amostragem, as amostras devem ser descartadas ou, se a campanha estiver próxima do fim, não se devem coletar mais incrementos.

2.5 PROJETO DE EXPERIMENTOS FATORIAL

Esta seção apresenta resumidamente uma ferramenta utilizada na metodologia deste trabalho, visando a facilitar a compreensão do que foi exposto nos capítulos 3 e 4, contudo, sem aprofundar-se nos conceitos matemáticos que norteiam a ferramenta.

Um problema trivial em estudos científicos é a necessidade de determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre uma resposta de interesse em um processo. Conforme explicam Barros Neto, Scarminio e Bruns,⁶⁵ o senso comum afirma que o modo mais apropriado de responder a problemas desse tipo seria realizar uma série de experimentos em que todas as demais variáveis – exceto aquela cuja influência se deseja avaliar – sejam constantes, enquanto o fator de interesse é variado em diversos níveis para determinar sua resposta no processo avaliado.

Contudo, essa metodologia é falha, pois não considera a possível interdependência entre as diferentes variáveis de um processo. Desse modo, a maneira mais assertiva de avaliar a influência de variáveis em uma ou mais respostas de um processo é utilizar ferramentas estatísticas para o planejamento, a execução e a interpretação de experimentos. Nesse contexto, o planejamento de experimentos

fatorial é uma das ferramentas estatísticas mais comuns para esse fim, aplicada no estudo de processos químicos, biológicos, mecânicos, agrícolas, entre outros. Além disso, é uma ferramenta adequada para processos em diversas escalas: laboratório, planta-piloto e industrial.

No planejamento de experimentos fatorial completo^{65,66} são predeterminados o número de variáveis estudadas e o número de “níveis” para cada uma, ou seja, são fixados valores a serem analisados para cada variável. A partir dessa definição, planejam-se (e realizam-se) experimentos com todas as possíveis combinações entre as variáveis estudadas e seus níveis. Após essa fase, ferramentas estatísticas são empregadas para calcular a influência de cada variável individualmente e de cada interação entre as variáveis nos resultados dos experimentos.

O objetivo dessa metodologia é obter avaliações matematicamente confiáveis, realizando-se o menor número possível de experimentos. Por isso, como afirmam Box e Hunter,⁶⁶ embora seja possível adotar qualquer número de níveis para cada variável, é comum adotarem-se apenas dois. O projeto de experimentos fatorial em dois níveis também simplifica a metodologia matemática empregada para a interpretação dos resultados.

Por outro lado, um processo pode ter dezenas de variáveis influenciando seus resultados e, à medida que o número de variáveis cresce, o planejamento fatorial de experimentos pode tornar-se moroso e caro. O planejamento de experimentos fatorial completo é adequado quando se deseja avaliar um número limitado de variáveis (em geral, limita-se o número máximo de variáveis a quatro).^{65,66,67}

Quando é necessário avaliar previamente as variáveis determinantes para os resultados, indica-se a metodologia de planejamento de experimentos fatorial fracionado. O projeto de experimentos fatorial fracionado consiste em realizar apenas uma parte dos experimentos planejados no projeto fatorial completo. Essa parte deve ser cuidadosamente escolhida também por meio de ferramentas estatísticas.

Neste trabalho foi empregada a metodologia de projeto de experimentos fatorial completo em dois níveis, que será descrita com mais detalhes nos próximos parágrafos.

Conforme exposto anteriormente, a metodologia de projeto de experimentos fatorial completo requer a realização de ensaios envolvendo todas as combinações possíveis entre as variáveis avaliadas e seus níveis. A lista dessas combinações é chamada de matriz de planejamento. Além dessas combinações, é comum realizar

cada experimento em réplicas para que se possa avaliar o erro associado à variância dos resultados.

Porém, ao se optar pela realização de réplicas, é essencial garantir que réplicas genuínas sejam conduzidas, ou seja, que todos os passos na realização de cada experimento sejam tomados novamente ao serem replicados. Além disso, a ordem de condução dos ensaios e de suas réplicas deve ser aleatória para garantir a minimização de ruídos que possam interferir nos resultados.⁶⁶

Após a realização dos experimentos, são calculadas as influências individuais de cada variável nos resultados (efeitos principais) e a influência nas interações entre as variáveis (efeitos de interação). O sinal positivo ou negativo do efeito corresponde a uma alteração no mesmo sentido na resposta estudada. Por sua vez, a magnitude do efeito fornece a informação de quão significativa é a influência desse efeito na resposta. Para ajudar a elucidar o que cada tipo de efeito representa matematicamente, pode-se tomar como exemplo uma matriz hipotética de experimentos para as variáveis A e B, com níveis, respectivamente, y_1 e y_2 (níveis inferior e superior para a variável A), e y_3 e y_4 (níveis superior e inferior para a variável B).

Os efeitos principais de cada variável correspondem à diferença entre as médias dos efeitos computados para ela dentro dos dois níveis adotados nos experimentos, ou seja, para a variável A o efeito principal é descrito por:

$$\text{Efeito principal variável A} = \bar{y}_2 - \bar{y}_1 \quad (\text{Equação 16})$$

Por outro lado, o efeito de interação das variáveis A e B (normalmente chamado de “AB”) corresponde a:

$$\text{Efeito AB} = \left(\frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_4}{2} \right) - \left(\frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_3}{2} \right) \quad (\text{Equação 17})$$

Por sua vez, a realização de cada ensaio com uma ou mais réplicas permite calcular o erro experimental ou erro-padrão do estudo. Para um projeto de experimentos com m ensaios, em que cada ensaio é repetido n vezes, a estimativa da variância experimental (s^2) é dada por:

$$s^2 = \frac{v_1 s_1^2 + v_2 s_2^2 + \dots + v_m s_m^2}{v_1 + v_2 + \dots + v_m} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

$v_i = n_i - 1$ é o número de graus de liberdade de s_i^2 (a variância do i-ésimo ensaio).

Por outro lado, o erro-padrão de um efeito é dado por:

$$s(\text{efeito}) = \sqrt{\frac{\sigma^2}{2}} \quad (\text{Equação 19})$$

O intervalo de confiança para cada efeito estimado (conforme as equações 16 e 17) pode ser construído utilizando-se a distribuição de Student:

$$\hat{\eta} - t_v \times s(\text{efeito}) < \eta < \hat{\eta} + t_v \times s(\text{efeito}) \quad (\text{Equação 20})$$

Na prática, a equação 20 representa o fato de que cada efeito só terá significância estatística se seu valor for superior (em termos absolutos) ao produto do erro-padrão do experimento pelo ponto da distribuição de Student, referente ao número de graus de liberdade do ensaio, pois, dessa forma, o intervalo de confiança desse efeito não abrange o valor zero. Para projetos de experimentos fatoriais em dois níveis, softwares de estatística como o Minitab® fornecem uma representação gráfica de quais efeitos são estaticamente relevantes. Nesses gráficos, chamados de gráficos de Pareto, os valores absolutos de cada efeito principal e dos efeitos de interação são representados por barras, em ordem decrescente de magnitude, no eixo das ordenadas. No eixo das abscissas, é plotada uma linha vertical de referência, que corresponde ao valor mínimo que cada efeito deve apresentar para possuir relevância estatística.

Outras ferramentas gráficas que auxiliam na visualização dos resultados de um projeto de experimentos fatorial são:

- gráficos dos efeitos principais: para cada variável, é possível construir um gráfico em que as respostas dos experimentos sejam plotadas em função dos valores de cada nível dessa variável;

- gráficos de interações: as respostas médias, relativas a duas variáveis, são plotadas a fim de mostrar todas as combinações possíveis entre seus níveis. Essa ferramenta auxilia na localização da melhor combinação de variáveis, para que se possa otimizar uma resposta desejada;
- superfícies de contorno: também são gráficos que auxiliam a identificar combinações de variáveis, a fim de atingir as respostas desejadas. Nesses gráficos, todos os pontos que representam a mesma resposta formam uma linha curva. Os eixos do gráfico, por sua vez, representam as variáveis.

2.6 CIRCUITO DE MOAGEM ESTUDADO NESTE TRABALHO

A usina industrial de pelotização da Vale Omã, localizada no país homônimo, recebe minério de ferro de duas regiões diferentes do Brasil e produz pelotas do tipo redução direta para os mercados do Oriente Médio, Ásia e África. A capacidade instalada dessa usina é de nove milhões de toneladas de pelotas por ano e dispõe de um berço portuário dedicado, um pátio de matérias-primas e produtos, um circuito de preparação de matérias-primas, duas linhas de pelotização com nove discos cada e dois fornos de tecnologia *Rotary kiln*.

A mistura de minérios recebidos do Brasil passa por uma etapa de remoagem, que é feita em um circuito com três moinhos a seco, operando em circuito fechado inverso com aeroclassificadores. A Figura 7 mostra o circuito: os moinhos operam em circuito fechado com dois separadores a ar em série. Inicialmente, a fração fina da descarga do moinho, ou seja, todo material que pode ser carregado pela corrente de ar promovida pelo diferencial de pressão entre a alimentação do moinho e o filtro de mangas, é alimentada num separador estático do tipo *grit separator*. O produto fino do separador estático passa por um filtro de mangas para despoeiramento. O produto grosseiro do separador estático constitui a alimentação do separador dinâmico, juntamente com a fração grosseira da descarga do moinho, transportada pelo elevador de canecos. O produto grosseiro do separador dinâmico constitui a carga circulante do circuito. A fração fina do separador dinâmico é decantada em quatro ciclones e se junta ao produto do filtro de mangas, compondo o produto final do

circuito. O ar quente é lançado no circuito por queimadores, que operam em série com os moinhos.

Figura 7 - Circuito de moagem da Vale Omã. Fonte: arquivo pessoal da autora.

A escolha do circuito de moagem em moinhos de bola a seco foi definida levando-se em consideração uma série de fatores:^c

- a ausência de dados de referência industriais e a alta abrasividade do minério representavam um potencial risco para a aplicação dos moinhos de rolos verticais. O consumo de revestimentos poderia comprometer a disponibilidade do circuito;
- conforme exposto anteriormente, um circuito utilizando apenas prensa de rolos não poderia gerar um produto com superfície específica adequada à pelletização. O circuito com duas prensas em série foi avaliado, mas apresentou custos de investimentos superiores ao circuito com moinho de bolas;
- os métodos de concentração das usinas de beneficiamento da Vale no Brasil são a úmido (flotação e concentração magnética); portanto, o *pellet feed* é produzido na forma de uma polpa e precisa ser filtrado antes do embarque. Por outro lado, os discos de pelletização requerem material remóido com umidade controlada em cerca de 8% na sua alimentação.

^c Dados de relatórios internos da Vale.

Desse modo, um circuito de remoagem a úmido em Omã demandaria o reempolpamento do *pellet feed* e sua posterior filtragem. Essa alternativa elevaria os custos de investimentos, e a energia “salva” na etapa de moagem a úmido seria consumida nas bombas de vácuo da filtragem. Além disso, a filtragem de *pellet feed* remoído é uma operação complicada, que, como se sabe, causa instabilidades operacionais às usinas de pelotização no Brasil.

O circuito de Omã possui três moinhos de bolas com 12 MW cada, do tipo dupla câmara. O primeiro compartimento corresponde à câmara de secagem, dotada de “pás” levantadoras para aumentar a superfície de contato do ar quente com o minério. Não há corpos moedores nesse compartimento. A câmara de secagem possui 4 m de comprimento e 6 m de diâmetro.

O segundo compartimento corresponde à câmara de moagem, que possui 6,6 m de diâmetro e 12 m de comprimento. A câmara de moagem conta com duas regiões de revestimentos: a primeira, situada logo após a câmara de secagem, possui revestimentos levantadores, com a função de quebrar a fração grosseira do minério. Como o primeiro compartimento não possui corpos moedores que possam danificar as pás instaladas nessa câmara, a reposição de bolas é feita pela abertura de descarga dos moinhos. Por essa razão, após a região de “britagem”, os revestimentos da câmara de moagem são do tipo classificadores, com a função de transportar os novos corpos moedores para o outro extremo do moinho. Os dois compartimentos dos moinhos são separados por um diafragma. A descarga dos moinhos também é dotada desse sistema.

A Figura 8 mostra os moinhos de dupla câmara, com uma câmara de secagem. A Figura 9 esquematiza as diversas regiões dos moinhos da usina de Omã. A Figura 10 mostra os revestimentos para britagem e os revestimentos classificadores.

Figura 8 – Moinhos de duplo compartimento com câmara de secagem. (Fonte: arquivo interno da Vale).

Figura 9 – Esquema dos moinhos da usina de Omã. (Fonte: arquivo interno da Vale).

Figura 10 – Detalhes dos revestimentos da câmara de moagem: (a) zona de britagem, (b) revestimentos classificadores. Arquivo interno da Vale.

O circuito de moagem é alimentado com uma mistura de *pellet feeds* do Sistema Sul da Vale Brasil (PFPT) e com o *sinter feed* de Carajás (IOCJ), na proporção aproximada de 70-30%. O minério é misturado com o retorno das pelotas queimadas (pelotas fora da especificação granulométrica que são expurgadas após o processo de queima), cal e antracito, antes da alimentação dos moinhos. O expurgo de pelotas queimadas, a cal e o antracito representam cerca de 5% do total da alimentação nova dos moinhos. As especificações para o produto da moagem são superfície específica mínima de 2200 cm²/g e mínimo de 80% passante em 45 µm.

A Tabela 10 e a Figura 11 mostram curvas granulométricas típicas dos materiais tratados. Como se pode verificar, são materiais bem distintos: IOCJ é um *sinter feed* naturalmente rico em ferro, que passa apenas por uma etapa de britagem primária antes de ser enviado a Omã. Por essa razão, possui uma fração grosseira, acima de 5 mm, que não é controlada antes do embarque. Por outro lado, o PFPT é uma mistura de concentrados de itabiritos do Sistema Sul que, portanto, já passou por etapas anteriores de moagem e concentração. Desse modo, trata-se de um material mais homogêneo e fino que o IOCJ.

Tabela 10 – Exemplo de distribuições granulométricas dos materiais IOCJ e PFPT

Tamanho (mm)	Porcentagem retida	
	IOCJ	PFPT
5	17,7%	0,3%
3,15	9,9%	0,1%
1,00	17,7%	0,2%
0,500	10,0%	0,2%
0,045	29,8%	53,6%
- 0,045	15%	45,7%

(Fonte – arquivo interno da Vale)

Figura 11 – Histogramas para granulometrias típicas dos materiais PFPT e IOCJ.

A mineralogia desses dois materiais também é bastante distinta: nos concentrados do Sistema Sul, advindos do beneficiamento de itabiritos, os principais minerais de ferro são as hematitas especular e lamelar, pouco porosas e que se caracterizam por baixa geração de área superficial na moagem fina. Por outro lado, no IOCJ predominam as hematitas compactas, de superfície rugosa e naturais geradoras de nova área superficial. A Figura 12 exemplifica as diferenças na composição mineralógica.

Figura 12 - Exemplos de composições mineralógicas para os materiais PFPT e IOCJ.

(Fonte – arquivo interno da Vale)

A combinação de ambos os materiais torna a alimentação do circuito atípica para um circuito de remoagem: embora a alimentação nova dos moinhos já possua uma grande quantidade de finos (material abaixo da malha de 45 µm), há também uma

fração grosseira que demanda o uso de corpos moedores de grande diâmetro (50 e 40 mm). Contudo, os requerimentos para o produto do circuito são típicos de moagem fina para pelotização, e é necessário garantir uma faixa estreita de qualidade para que se tenha uma operação estável nas etapas subsequentes.

Por outro lado, a mineralogia dos dois materiais também influi no desempenho do circuito de remoagem: o PFPT costuma apresentar maior requerimento energético do que o ICOJ. Adicionalmente, considerando-se níveis iguais de energia aplicada, o PFPT tem tendência maior de geração de finos (% passante em 45 μm), enquanto o IOCJ é um gerador natural de nova área superficial, devido às características mineralógicas já expostas. Supondo-se o menor requerimento energético e a facilidade de geração de área superficial do IOCJ, sob a ótica de produtividade na remoagem, é desejável maximizar o uso desse material na mistura que alimenta o circuito.

No entanto, a participação de IOCJ depende da garantia de qualidade química da pelota. Por não passar por etapas prévias de concentração, esse material tem teores de contaminantes superiores ao PFPT. Esse fato também restringe o controle de sua qualidade às operações de lavra e, portanto, apresenta mais flutuações. A Figura 13 e a Figura 14 ilustram essas diferenças.

Figura 13 – Teores de Fe e contaminantes típicos para o PFPT.

Fonte: arquivo interno da Vale.

Figura 14 – Teores de Fe e contaminantes típicos para o IOCJ.

Fonte: arquivo interno da Vale.

Normalmente, a usina industrial de Omã recebe sua matéria-prima por lotes, em navios do tipo Valemax, com capacidade de 400.000 toneladas. O recebimento desse volume de minério requer a formação de grandes pilhas de estocagem no pátio, onde há segregação granulométrica e percolação de água do topo em direção à base. Portanto, a logística de controle de qualidade da usina está ligada ao cronograma de recebimento dos navios de matéria-prima, que, por sua vez, sofre a influência do atendimento a outros mercados da empresa. Desse modo, em um único mês de operação da usina, o circuito de moagem pode receber diferentes composições de minério, que dependem da qualidade química dos materiais em estoque, dos níveis de estoque da matéria-prima e da umidade da matéria-prima no pátio de estocagem, uma vez que a capacidade dos moinhos também depende da matéria-prima e deve ser controlada. O circuito de moagem, notadamente a operação dos aeroclassificadores, é conduzido com o objetivo de manter no produto a faixa estreita de qualidade, que, conforme explicado, é requerida para evitar distúrbios operacionais na etapa de pelotização.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PLANO GERAL DE TRABALHO

O planejamento deste trabalho compõe três etapas interdependentes, conforme o fluxograma mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma para o plano inicial de ensaios deste trabalho.

O primeiro passo consistiu em validar a metodologia de laboratório já empregada nas demais plantas de beneficiamento e de pelletização da Vale, a saber, o ensaio de moagem Donda. Embora esse ensaio tenha sido desenvolvido para a moagem a úmido, julgou-se inadequado simplesmente descartá-lo sem comprovar sua aplicação no circuito estudado. Ademais, metodologias consolidadas na literatura, como o Wi de Bond, consistem em um ensaio de laboratório realizado a seco e utilizado para prever o comportamento de circuitos de moagem a úmido. Portanto, a despeito das particularidades operacionais entre a moagem de bolas a úmido e a seco, não é possível afirmar de antemão que ensaios de laboratório devem reproduzir com fidelidade as condições dos circuitos industriais.

Após a etapa de validação do método Donda, iniciou-se o desenvolvimento de um ensaio a seco para a previsão do consumo de energia do circuito industrial

estudado, que se deu em três etapas. Na primeira, ensaios de laboratório com caráter exploratório foram utilizados para investigar a correlação de variáveis operacionais dos ensaios com suas variáveis de resposta. Na segunda etapa, utilizou-se a ferramenta projeto de experimentos fatorial para definir as condições dos ensaios de laboratório que melhor refletem as variáveis de controle industriais, a saber, o consumo específico de energia e as correspondentes granulometria e superfície específica no produto do moinho. Por fim, a etapa de validação consistiu em realizar diversos ensaios com amostras industriais e confrontá-los com os resultados industriais.

Adicionalmente, como mostra a Figura 15, além do desenvolvimento do ensaio de moagem em si, julgou-se necessário comprovar a aplicabilidade da equação de Rowland¹ à previsão do consumo de energia de moinhos de laboratório. Essa comprovação foi importante para balizar o trabalho aqui proposto, uma vez que todos os ensaios de moagem foram realizados com a premissa de que a equação de Rowland é aplicável ao contexto estudado. Portanto, nessa etapa do trabalho, foram realizados ensaios de moagem em um moinho de torque, dotado de instrumentação para a medição do consumo de energia em cada ensaio. Em seguida, o consumo de energia medido foi comparado com o consumo de energia estimado pela equação de Rowland.

Na próxima seção, cada etapa será descrita em detalhes.

3.2 ENSAIOS A ÚMIDO – MÉTODO DONDA

Os ensaios a úmido mantiveram a metodologia básica descrita no item 2.2.5, porém com alguns ajustes:

- o moinho utilizado foi o de Bond, com dimensões de 12 x 12 pol (0,3048 x 0,3048 m), pois esse era o único jarro disponível no laboratório da planta;
- o *top size* da carga de bolas foi alterado para 40 mm, pois esse era o *top size* da carga de bolas nos moinhos industriais na época dos ensaios;
- a massa total da carga de bolas foi alterada para 30 kg, e a massa de amostra, aumentada para 5,7 kg, de modo que manteve a mesma relação de

polpa/vazios e a mesma porcentagem de enchimento utilizadas no ensaio original.

Conforme apontado por Donda,⁴⁶ o moinho de laboratório não precisa ser exatamente o mesmo utilizado pelo autor, contanto que a massa de amostra seja recalculada para obedecer à relação entre volume de polpa e volume de interstícios da carga de 1,21 – condição definida como ideal para o método proposto. Essas condições foram respeitadas nos ensaios a úmido aqui realizados. Também segundo a recomendação do autor, as bolas utilizadas nos ensaios foram as mesmas do circuito industrial: bolas fundidas, do tipo alto cromo.

As análises granulométricas que compõem os ensaios de moagem foram realizadas por peneiramento vibratório a seco, exceto para a malha de 45 μm . No laboratório de Omã, o equipamento utilizado para o peneiramento na malha de 45 μm é um peneirador aerodinâmico, modelo Retsch AS200 jet. O método de análise granulométrica dos ensaios seguiu a mesma metodologia empregada nas análises de rotina do laboratório – feitas para controle industrial –, possibilitando a comparação de resultados.

O peneirador aerodinâmico é muito empregado na análise de materiais finos que foram moídos a seco, especialmente na indústria de cimento, porque esses materiais tendem a formar agregados. O jato de ar propiciado por esse equipamento tende a diminuir a influência dos agregados na análise granulométrica. A Figura 16 mostra o princípio de funcionamento desse peneirador.

Figura 16 – Princípio de funcionamento do peneirador aerodinâmico. Fonte: adaptado de <https://wstyler.com/particle-analysis/alpine-air-jet-sieve/how-it-works/>.

As medições de superfície específica foram realizadas em permeâmetro Blaine automático, modelo Toniperm 6565.

Os resultados dos ensaios foram avaliados segundo os dois parâmetros descritos por Donda e Rosa⁴⁷: o parâmetro k , que descreve o comportamento do minério na moagem quanto à geração de finos e pode ser calculado segundo a equação 6, e o parâmetro $BSA/kWh/t$, que se refere à geração de área superficial específica na moagem. O parâmetro $BSA/kWh/t$ pode ser calculado pela equação:

$$BSA/\frac{kWh}{t} = \frac{Blaine_{prod} - Blaine_{alim}}{Energia} \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

Energia = consumo específico de energia no eixo pinhão (kWh/t).

Os parâmetros k e $BSA/kWh/t$ foram empregados por terem sido propostos pelo autor do ensaio de laboratório e validados por uma base de dados industriais robusta para o comportamento de itabiritos em circuitos de remoagem a úmido. Além disso, esses parâmetros se tornaram uma variável de controle operacional em usinas de concentração e pelotização da Vale.

Os ensaios foram realizados com amostras mensais, referentes à alimentação do circuito industrial, por um período de dez meses.

3.2.1 Energia despendida na câmara de secagem

Como os moinhos de Omã são do tipo dupla câmara, com um compartimento destinado apenas à secagem do material, julgou-se necessário avaliar se a energia elétrica despendida por esse compartimento deve ser considerada nos ensaios de laboratório. A potência disponível nos instrumentos de controle da planta industrial refere-se à potência total dos moinhos, ou seja, aos dois compartimentos. Em teoria, porém, a quebra das partículas só ocorre no segundo compartimento, onde há corpos moedores.

Desse modo, utilizou-se a equação 11, apresentada no item 2.3.5, para estimar a energia despendida na câmara de secagem dos moinhos industriais. A Tabela 11 resume os valores empregados.

Tabela 11 – Parâmetros para o cálculo da energia na câmara de secagem

Parâmetro	Valor
Porosidade da carga	0,4
Densidade das bolas (g/cm ³)	7,8
Densidade dos sólidos (g/cm ³)	5,0
Porcentagem de sólidos da alimentação	94%
Porcentagem de enchimento total do moinho	15%
Porcentagem de bolas	0%
Rotação do moinho (% velocidade crítica)	73%
Diâmetro (m)	6,0
Comprimento (m)	4,0

Fonte: arquivo pessoal da autora.

A literatura especializada afirma que, em geral, a porosidade da carga (volume de interstícios da carga de bolas) corresponde a 40% do volume interno do moinho ocupado pelas bolas.^{49,52} Adotou-se esse número neste e nos demais cálculos do presente trabalho, uma vez que métodos experimentais de medição desse parâmetro não são precisos.

A potência estimada para a câmara de secagem foi descontada da potência total dos moinhos industriais antes de se compararem os resultados industriais com os resultados de laboratório.

3.3 ENSAIOS PARA A AVALIAÇÃO DE VARIÁVEIS RELEVANTES AO MÉTODO DE LABORATÓRIO

Os ensaios exploratórios a seco tiveram o objetivo de fixar alguns parâmetros e reduzir o número de variáveis no desenvolvimento do projeto de experimentos fatorial. Além disso, auxiliaram na definição dos níveis superior e inferior das variáveis estudadas.

Por questões práticas, optou-se por fixar as dimensões do moinho por ser ele o único disponível no laboratório da planta industrial de Omã e constituir um jarro relativamente padronizado em quaisquer outros laboratórios, já que se refere ao moinho usado para determinar o W_i de Bond. Pelo mesmo motivo, optou-se, em princípio, por não alterar o *top size* da amostra, levando-se em consideração os seguintes aspectos:

- o circuito de Omã foi concebido para a remoagem de *pellet feed* preparado no Brasil; isso significa que a alimentação do circuito é fina por natureza;
- não há controle do *top size* de alimentação no circuito industrial;
- mesmo com a inclusão do *sinter feed*, o *top size* da alimentação do circuito industrial continua adequado ao diâmetro do moinho de laboratório. O ensaio de Donda para moagem primária, por exemplo, que utiliza o mesmo jarro, adota amostra com *top size* de 9,5 mm;
- eliminando-se o controle do *top size*, há simplificação do ensaio.

Com base na experiência do desenvolvimento dos ensaios para moagem primária e secundária da mina de Germano e no estudo da literatura, foram avaliadas as variáveis relação entre a carga de bolas e a carga de minério, bem como a composição da carga de bolas.

3.3.1 *Top size* da carga de bolas

Para avaliar a composição de carga de bolas mais adequada à distribuição granulométrica da amostra, foram realizados ensaios exploratórios variando a porcentagem de bolas de 50 mm na carga total. O *top size* da carga de bolas desses ensaios foi escolhido levando-se em conta que, no circuito industrial estudado, a carga de reposição é composta por uma mistura de bolas de 50 e 40 mm.

As cargas de bolas foram compostas de maneira escalonada, de acordo com o método proposto por Bond (*apud* Rowland).¹ Foram realizados ensaios a seco, com cinco composições de carga diferentes: 0 (*top size* de 40 mm), 10, 15, 20 e 25% de bolas de 50 mm. Nestes e em todos os ensaios a seco aqui realizados, as bolas são as mesmas utilizadas no circuito industrial. As demais condições dos ensaios são

descritas na Tabela 12. Para cada ensaio, foi construída a curva de taxa de quebra, que consiste no parâmetro k , calculado por faixa granulométrica.

Tabela 12 – Condições dos ensaios para a avaliação do *top size* da amostra x carga

Variável	Condição
Dimensões do moinho	12 x 12 pol (0,3048 x 0,3048 m)
% Velocidade crítica	70,6% (58 rpm)
Massa de amostra	5,7 kg

Fonte: arquivo pessoal da autora.

3.3.2 Massa de amostra

À luz das constatações encontradas na literatura, a relação entre volume de amostra e volume de vazios (volume de interstícios) da carga de bolas foi investigada mediante a realização de ensaios exploratórios em uma ampla faixa dessa variável, de 0,4 (referência ao ensaio de Bond) até 1,1 (ensaio de Donda). Os ensaios foram efetuados a seco, e a massa de amostra para cada ensaio foi calculada assumindo-se que o volume de vazios da carga de bolas corresponde a 40% do volume que ela ocupa no moinho. A Tabela 13 mostra a massa de amostra utilizada em cada caso. As demais condições dos ensaios foram as mesmas descritas na Tabela 12. Utilizou-se uma carga de bolas escalonada, com *top size* de 40 mm em todos os ensaios.

Tabela 13 – Massa de amostra utilizada em cada ensaio

Volume de amostra/volume de vazios da carga de bolas	Massa de amostra (kg)
1,1	5,7
1	5,34
0,8	4,27
0,6	3,20
0,4	2,14

Fonte: arquivo pessoal da autora.

3.4 VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO DE ROWLAND

Para a validação da equação de Rowland¹ foram realizados ensaios em um moinho de torque, replicando-se as condições dos ensaios a seco, desenvolvidos no laboratório industrial. Os ensaios de moagem foram realizados no moinho de torque instalado no Laboratório de Tratamento de Minérios da Escola Politécnica da USP (LTM-EPUSP).

Amostras de IOCJ e PFPT foram utilizadas em diferentes proporções, conforme o plano de ensaios mostrado na Tabela 14. Os três primeiros ensaios foram realizados com o intuito de variar o nível de energia aplicado à amostra. Os demais ensaios foram realizados com intuito de varrer as faixas de composições de minério observadas na planta industrial de Omã. Nestes foi aplicado um tempo de moagem correspondente a 21kWh/t – de acordo com a equação de Rowland –, que corresponde ao consumo específico médio de energia no circuito industrial. A Tabela 15 resume as condições padronizadas dos ensaios no moinho de torque.

Tabela 14 – Programa de ensaios no moinho de torque

Ensaio	%IOCJ	%PFPT	Tempo de moagem (min)
1	20	80	8
2	20	80	16
3	20	80	30
4	15	85	43
5	25	75	43
6	30	70	43
7	35	65	43

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Tabela 15 – Condições padronizadas para os ensaios com moinho de torque

Variável	Condição
Dimensões do moinho	12 x 12 pol (0,3048 x 0,3048 m)
Ensaio	A seco
Rotação	58 rpm
Massa de amostra	4,27 kg
Carga de bolas	30 kg, escalonada entre 40 e 12,5 mm

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Os valores de torque medidos no instrumento do moinho de laboratório foram convertidos em potência de acordo com a equação:

$$\text{Potência} = \text{torque} \times \text{rotação moinho} \quad (\text{Equação 22})$$

Os valores de energia calculados a partir do torquímetro foram comparados com os calculados de acordo com a equação de Rowland.

3.5 PROJETO DE EXPERIMENTOS

Após os ensaios exploratórios, foi utilizada a metodologia do projeto de experimentos fatorial para definir os níveis para as variáveis *top size* da carga de bolas e a relação de amostra/vazios da carga. A tabela a seguir mostra o plano de ensaios realizado.

Tabela 16 – Plano de ensaios para o projeto de experimentos		
Teste	% bolas de 50 mm	Volume de amostra/volume de vazios da carga
1	25	0,4
2	25	1,1
3	0	1,1
4	25	0,4
5	25	1,1
6	0	0,4
7	0	1,1
8	0	0,4

Fonte: arquivo pessoal da autora.

As variáveis de resposta avaliadas foram a granulometria do produto (porcentagem passante na malha de 45 μm) e a superfície específica do produto. Não foram calculados os parâmetros k e BSA/kWh/t nesse caso porque se aplicou apenas um nível de energia por ensaio e o cálculo desses parâmetros não seria exato com apenas dois pontos (a amostra “tal qual” e a amostra moída no mesmo nível de energia observado industrialmente).

Para esses ensaios, coletou-se uma amostra da alimentação do circuito industrial pelo período de um dia. O mesmo nível de energia (kWh/t) observado no

circuito industrial (medido por instrumentos *on-line* de controle) foi utilizado nos ensaios.

3.6 MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES ESCOLHIDAS

Após a realização do projeto de experimentos fatorial, definiram-se as condições para os ensaios a seco e estabeleceu-se uma rotina de ensaios com amostras compostas da alimentação do circuito industrial. Os resultados dos ensaios de laboratório foram, então, monitorados em comparação com os resultados obtidos industrialmente. A Tabela 17 resume as condições dos ensaios de moagem realizados nessa fase.

Tabela 17 – Condições dos ensaios de moagem realizados durante o período de validação

Variável	Condição
Dimensões do moinho	12 x 12 pol (0,3048 x 0,3048 m)
Ensaio	A seco
% Velocidade crítica	70,6% (58 rpm)
Massa de amostra	4,27 kg
Carga de bolas	30 kg, escalonada entre 40 e 15 mm

Fonte: arquivo pessoal da autora.

As amostras para essa fase do trabalho foram coletadas no período de maio a dezembro de 2018. A princípio, as amostras foram compostas em intervalos quinzenais; a partir de setembro, a periodicidade dos ensaios foi reduzida para semanal, com o propósito de aumentar a base de dados do trabalho. Não houve amostragem nos períodos entre 9 a 15 de setembro e de 11 a 17 de novembro porque o circuito industrial estava em manutenção programada. O período entre 21 de outubro e 03 de novembro também foi desconsiderado devido a problemas operacionais no pátio de matérias-primas e à consequente contaminação das pilhas de IOCJ, que gerou grande instabilidade no circuito de moagem industrial. Ao todo, foram realizados 19 ensaios nessa fase para a validação do método proposto.

Ao longo desse período, porém, alguns ensaios adicionais foram incluídos no plano de trabalho, com o propósito de investigar melhor os resultados. Essas

investigações são fruto das observações dos dados obtidos. A seguir são descritos os ensaios adicionais.

3.6.1 Ensaios com o controle do *top size* da amostra

Para investigar o comportamento dos resultados dos ensaios de laboratório quanto à granulometria da alimentação do moinho, optou-se por realizar ensaios com o controle do *top size* da amostra.

A decisão quanto à malha a ser adotada para o controle da amostra teve por base os ensaios de Donda, já presentes na rotina da empresa. Nesse método, quando o jarro de 12 x 12 pol é utilizado, a amostra é britada a -9,52 mm, e carga de bolas tem *top size* de 63 mm. Por outro lado, o método aqui proposto utiliza carga de bolas com *top size* de 40 mm. Para o controle do *top size* da amostra nos ensaios a seco na mesma proporção do diâmetro da carga de bolas entre os dois métodos, deve-se adotar a malha de 6 mm.

Contudo, o laboratório da planta industrial não possui britadores, já que o foco da planta é a pelotização de minério previamente beneficiado no Brasil. Para o controle do *top size* da amostra, portanto, adotou-se o escalpe em uma malha um pouco mais grosseira do que a estipulada (8 mm), e a fração retida nessa peneira foi descartada antes da execução do ensaio de moagem.

Descontando-se o escalpe na amostra de alimentação, as demais condições dos ensaios permaneceram as mesmas escolhidas com o projeto de experimentos. Para avaliar a influência do *top size* da alimentação, foram realizados dois ensaios com cada amostra: o primeiro sem o controle da granulometria de alimentação e o segundo com a alimentação escalpada na malha de 8 mm. A Figura 17 mostra o fluxograma de ensaios.

Figura 17 – Fluxograma para os ensaios controlando-se o *top size* das amostras.

3.6.2 Análise de sensibilidade dos ensaios à granulometria de alimentação

Em complementação aos ensaios com o controle do *top size* da amostra e com a finalidade de investigar a sensibilidade da metodologia proposta à granulometria de alimentação, realizou-se uma batelada de ensaios manipulando-se essa variável. Três diferentes distribuições granulométricas foram compostas em laboratório a partir de uma única amostra-base.

A princípio, a amostra original foi peneirada em diferentes faixas granulométricas, e a massa retida em cada peneira foi mantida separadamente. Em seguida, a partir da curva granulométrica da amostra original, estimaram-se três curvas granulométricas teóricas para representar diferentes pontos relativos às características da alimentação do circuito industrial: uma correspondente à granulometria média, a segunda para representar um período de alimentação grosseira, e a terceira relativa a uma alimentação fina. As massas retidas em cada peneira foram, então, manipuladas de acordo com as porcentagens retidas, calculadas para cada distribuição granulométrica. Os ensaios de moagem para cada

amostra assim composta foram realizados segundo as condições expostas na Tabela 17.

Para facilitar a compreensão dos resultados, também foi realizada a análise mineralógica das amostras de alimentação de cada ensaio de moagem. As análises foram efetuadas no laboratório interno da unidade de Alegria da empresa Vale, por microscopia ótica. A Figura 18 mostra o fluxograma dos ensaios.

Figura 18 – Fluxograma dos ensaios de sensibilidade à alimentação.

3.7 AMOSTRAGENS

Para os ensaios deste trabalho, foi realizada uma série de amostragens no circuito industrial de Omã e nos portos de origem dos materiais PFPT e IOCJ: as amostras coletadas no circuito industrial foram utilizadas nos ensaios a úmido, nos ensaios a seco exploratórios (para a investigação das variáveis de laboratório), no projeto de experimentos fatorial e nos ensaios de validação do método. Por sua vez, os ensaios conduzidos no LTM-EPUSP, com moinho de torque, utilizaram amostras obtidas durante o carregamento de remessas de IOCJ e PFPT para a planta de Omã,

respectivamente nos terminais marítimos de Ponta Madeira, no Pará, e Tubarão, no Espírito Santo.

As amostras referentes à alimentação nova do circuito industrial de Omã foram coletadas manualmente nos alimentadores de cada moinho. Na verdade, cada amostra correspondeu a uma composição do material coletado nos transportadores de correias dos três moinhos industriais.

No circuito industrial, a umidade na alimentação nova deve ser controlada constantemente, uma vez que interfere diretamente na capacidade de processamento dos moinhos a seco. Desse modo, uma rotina de amostragem com frequência de quatro horas já está implementada no laboratório industrial. A cada dia, são coletadas 32 diferentes amostras, referentes à alimentação nova do circuito para o controle de umidade: elas foram usadas como incrementos na composição das amostras para os ensaios de moagem, representando diferentes períodos de operação.

Os resultados dos ensaios de moagem sempre foram comparados com os resultados do produto do circuito industrial. Para tanto, também foram coletadas amostras do produto final do circuito dos moinhos industriais nos mesmos horários de coleta das amostras referentes à alimentação do circuito. O produto de cada moinho também é amostrado rotineiramente a cada quatro horas para controle operacional. Nesse ponto do circuito, porém, a amostragem é automática, feita com cortadores do tipo rotativo. Analogamente à composição das amostras que constituíram a alimentação dos ensaios de moagem, cada amostra de quatro horas constituiu um incremento da amostra referente ao produto global do circuito, representando diferentes períodos de operação estudados. As amostras referentes à alimentação do circuito foram secas em estufa antes da realização dos ensaios; as referentes ao produto dos moinhos já se encontravam secas no circuito industrial, mas foram mantidas em estufa até o momento das análises para evitar absorção de umidade.

A Figura 19 mostra os pontos de amostragem no circuito industrial. A Figura 20 ilustra o processo de composição das amostras.

Figura 19 – Pontos de amostragem no circuito industrial de Omã: (1) alimentação nova do circuito e (2) produto final. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 20 – Fluxograma de composição das amostras referentes ao circuito industrial de Omã. Fonte: arquivo pessoal autora.

Quanto à amostragem na alimentação dos moinhos industriais, devido à alta frequência de amostragem, não seria prático parar os transportadores de correia para a coleta e a “varredura” completa do material em determinado comprimento do tapete, como recomendam os procedimentos internacionais. Devido a essa dificuldade, são coletadas amostras com o transportador em movimento, com o auxílio de um coletor em forma de colher, em três incrementos e em diferentes pontos do perfil formado pelo material na correia, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Pontos de coleta dos incrementos nos alimentadores dos moinhos industriais. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Embora esse método de amostragem não respeite os princípios teóricos discutidos no item 2.4, a necessidade de dados rápidos e frequentes para o controle operacional de umidade invalidam a utilização de outros métodos. Se a amostragem fosse realizada em fluxo contínuo, o método ideal constituiria no corte do fluxo em um chute de transferência. Contudo, não há acessos para amostragem em nenhum chute de transferência. Por sua vez, a varredura da amostra em determinado comprimento do transportador de correia exigiria sua parada. A coleta da amostra em si é uma atividade que requer poucos minutos, mas os procedimentos exigidos pelas normas de segurança do trabalho delongam a tarefa que, na prática, toma algumas horas. Desse modo, a amostragem resultaria em perdas significativas de produção. Por outro lado, o grande número de incrementos usados na composição das amostras teve por objetivo absorver as variações nas características do material, que normalmente são observadas na alimentação do circuito.

Por sua vez, as amostras para os ensaios com moinho de torque foram realizadas nos terminais de Ponta Madeira e Tubarão, facilitando a logística de transporte ao laboratório da EPUSP. Ambos os terminais se dedicam à distribuição de produtos com destino a clientes internos e externos da empresa, o que demanda um sistema de amostragem padronizado e certificado, de acordo com a norma ISO 3082.⁶⁴

O transportador de correia que compõe o carregador dos navios é dotado de sistemas automáticos de coleta de amostra. Os sistemas contam com dois

amostradores do tipo cortador de fluxo linear, que operam em série e são seguidos por um divisor rotativo. Para cada embarque são coletadas cinco amostras parciais, compostas por um número de incrementos definidos segundo a norma supracitada e calculados a partir da massa total de embarque. Ambas as amostras enviadas ao LTM-EPUSP se referem a uma composição com as cinco amostras parciais, coletadas durante o carregamento de navios programados para a usina de Omã, no mês de março de 2018. A Figura 22 mostra o fluxograma de composição dessas amostras. A Figura 23 mostra o sistema automático de coleta nos terminais.

Figura 22 – Fluxograma de composição das amostras para os ensaios no moinho de torque.
Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 23 – Amostradores automáticos usados nos terminais marítimos. Fonte: arquivo interno da empresa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIOS EXPLORATÓRIOS – MÉTODO DE DONDA

4.1.1 Ensaios a úmido

Os ensaios a úmido seguindo o método proposto por Donda foram realizados com amostras mensais do circuito industrial de Omã. Os parâmetros k e BSA/kWh/t, calculados tanto para os resultados de laboratório quanto para os industriais, são apresentados na Tabela 18. Os parâmetros foram calculados conforme as equações 6 e 21. Além disso, também são apresentados os parâmetros k e BSA/kWh/t de laboratório, aplicando-se o fator de Rowland³¹ para a moagem a seco, de 0,7. Os resultados se referem ao período de janeiro a outubro de 2017. Devido a problemas operacionais, não houve amostragem no circuito industrial nos meses de novembro e dezembro de 2017.

Tabela 18 – Resultados dos ensaios de moagem a úmido

Mês	Dados industriais		Resultados de laboratório		Resultados de laboratório aplicando-se o fator de Rowland para a moagem a seco	
	k	BSA/kWh/t	k	BSA/kWh/t	k	BSA/kWh/t
Janeiro	0,042	75,6	0,076	96	0,053	67
Fevereiro	0,041	88,9	0,085	132	0,06	92,4
Março	0,042	82,2	0,081	105	0,057	73,5
Abril	0,04	71,9	0,047	71,6	0,033	50,1
Maio	0,044	77,7	0,072	81,8	0,05	57,3
Junho	0,055	100,6	0,08	86,7	0,056	60,7
Julho	0,056	94	0,086	73	0,06	51,1
Agosto	0,067	98,5	0,086	63	0,06	44,1
Setembro	0,053	109,2	0,088	84	0,062	58,8
Outubro	0,055	107,7	0,084	84,7	0,059	59,3

Fonte: arquivo pessoal da autora.

A Figura 24 e Figura 25 ilustram os resultados antes da aplicação de quaisquer fatores de correção. Nesses gráficos, os resultados de laboratório e industriais são contrastados com uma reta identidade, para auxiliar na visualização dos resultados. Com o mesmo propósito, as linhas pontilhadas foram incluídas para delimitar uma região de desvio dos dados de laboratório em relação aos industriais. O desvio de 15% foi escolhido como máximo aceitável para a validação da metodologia.

Figura 24 – Comparação do parâmetro k de laboratório e industrial para os ensaios a úmido.
Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 25 - Comparação do parâmetro BSA/kWh/t de laboratório e industrial para os ensaios a úmido.
Fonte: arquivo pessoal da autora.

A Figura 24 mostra que o parâmetro k para os ensaios a úmido foi consistentemente superior ao parâmetro k industrial. O mesmo gráfico mostra que os desvios entre os resultados de laboratório e industriais foram superiores a 15% em todos os ensaios. Com relação ao parâmetro BSA/kWh/t, a Figura 25 mostra resultados de laboratório mais próximos aos industriais, se comparados com o parâmetro k, e é possível observar três pontos dentro da área delimitada para o desvio de 15% dos dados de laboratório em relação aos industriais. Contudo, as diferenças entre os resultados de laboratório e os industriais ainda são significativas.

Desse modo, a aplicação dos ensaios a úmido para a previsão do comportamento do circuito a seco parece depender de fatores de correção. Para avaliar esse aspecto, na Figura 26 e na Figura 27 são mostrados os mesmos parâmetros após a aplicação do fator de Rowland para a moagem a seco nos dados de laboratório.

Figura 26 – Comparação do parâmetro k de laboratório após aplicação do fator de correção para moagem a seco x industrial. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 27 - Comparação do parâmetro BSA/kWh/t de laboratório após aplicação do fator de correção para moagem a seco x industrial. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Como mostra a Figura 26, a aplicação do fator de correção para a moagem a seco diminuiu o desvio entre o parâmetro k de laboratório e o industrial. Quanto ao parâmetro BSA/kWh/t, porém, a aplicação do fator de correção teve um efeito

negativo, aumentando a diferença entre os dados industriais e de laboratório. De fato, a literatura especializada^{29,26,28,32} afirma que a geração de superfície específica é superior na moagem a seco em comparação com aquela a úmido. Contudo, a dispersão de dados do parâmetro BSA/kWh/t dos ensaios a úmido não pode ser explicada mesmo sem a aplicação do fator de correção.

Desse modo, mesmo com a aplicação do fator de correção para a moagem a seco, os ensaios a úmido não refletiram o comportamento industrial.

4.1.2 Energia na câmara de secagem

Adicionalmente à aplicação do fator de Rowland para a moagem a seco, os dados dos ensaios de moagem a úmido foram comparados com os dados industriais após descontar-se a energia referente à câmara de secagem, uma vez que o moinho de laboratório só dispõe de um compartimento. A potência na câmara de secagem foi calculada segundo a equação 11 e de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 11, obtendo-se o valor de 1250 kW.

Desse modo, os índices k e BSA/kWh/t industriais foram recalculados descontando-se o valor de 1250 kW na potência total dos moinhos. A Tabela 19 resume os resultados.

Tabela 19 – Comparação dos dados industriais, descontando-se a energia na câmara de secagem com os ensaios de laboratório a úmido

Dados industriais			Dados industriais, descontando-se a energia na câmara de secagem		Resultados de laboratório		Resultados de laboratório com fator de correção de Rowland	
Mês	k	BSA/kWh/t	k	BSA/kWh/t	k	BSA/kWh/t	k	BSA/kWh/t
Janeiro	0,042	75,6	0,055	98,2	0,076	96	0,053	67
Fevereiro	0,041	88,9	0,054	118,4	0,085	132	0,060	92,4
Março	0,042	82,2	0,053	106,5	0,081	105	0,057	73,5
Abril	0,04	71,9	0,046	81	0,047	71,6	0,033	50,1
Maio	0,044	77,7	0,05	87,9	0,072	81,8	0,050	57,3
Junho	0,055	100,6	0,053	90,6	0,08	86,7	0,056	60,7
Julho	0,056	94	0,05	87,4	0,086	73	0,060	51,1
Agosto	0,067	98,5	0,068	100,2	0,086	63	0,060	44,1
Setembro	0,053	109,2	0,054	108,8	0,088	84	0,062	58,8
Outubro	0,055	107,7	0,058	109,3	0,084	84,7	0,059	59,3

Fonte: arquivo pessoal da autora.

A Figura 28 e a Figura 29 mostram a comparação entre os dados de laboratório para os ensaios a úmido e os dados industriais após descontar-se a energia na câmara de secagem. Os gráficos utilizam os mesmos recursos visuais adotados nos gráficos mencionados no capítulo anterior.

Figura 28 - Ensaio de laboratório a úmido x dados industriais descontando-se a potência na câmara de secagem – parâmetro k. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 29 - Ensaio de laboratório a úmido x dados industriais descontando-se a potência na câmara de secagem – parâmetro BSA/kWh/t. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Como mostra a Figura 28, ao descontar-se a potência relativa à câmara de secagem dos dados industriais, a diferença entre o parâmetro k industrial e de laboratório diminuiu, mas a maioria dos pontos ainda se encontra acima do desvio de 15%. Por outro lado, ao descontar-se a energia referente à câmara de secagem no cálculo do parâmetro BSA/kWh/t industrial, nota-se a maior aproximação deste com os resultados de laboratório, conforme a Figura 29. Nesse caso, a maior parte dos pontos passa a configurar no desvio máximo admitido de 15%, e há vários pontos com desvio igual ou inferior a 10%.

Para completar a análise, os dados industriais – descontando-se a energia referente à câmara de secagem –, foram comparados com os dados de laboratório após a aplicação do fator de Rowland para a moagem a seco. A Figura 30 e a Figura 31 mostram os resultados.

Figura 30 – Comparação entre parâmetro k de laboratório e industrial (sem energia na câmara de secagem). Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 31 - Comparação entre parâmetro BSA/kWh/t de laboratório e industrial (sem energia na câmara de secagem). Fonte: arquivo pessoal da autora.

A Figura 30 mostra que os dados de laboratório (ensaios a úmido) se aproximam bastante dos industriais com a aplicação de ambos os fatores de correção, a saber, o fator de Rowland para a moagem a seco nos dados de laboratório e descontando-se a energia referente à câmara de secagem nos resultados industriais: 6 entre 10 pontos correspondem a um desvio menor que 10% entre os dados de laboratório e os industriais, e 9 entre 10 correspondem a um desvio inferior a 15%.

Por outro lado, a Figura 31 mostra que a aplicação dos mesmos fatores não reduziu as diferenças entre o parâmetro BSA/kWh/t de laboratório e os dados industriais.

Em resumo, para o conjunto de dados estudado, a aplicação dos ensaios de Donda para a previsão do consumo de energia na moagem a seco mostrou que:

- em relação ao parâmetro k , é possível prever o comportamento industrial com erro relativo de até 15% a partir da aplicação de dois fatores, a saber, o fator de Rowland para a moagem a seco nos dados de laboratório e descontando-se a energia relativa à câmara de secagem nos dados industriais;
- em relação ao parâmetro $BSA/kWh/t$, os melhores resultados são obtidos apenas descontando-se a energia relativa à câmara de secagem dos dados industriais; ainda assim, os desvios entre os dados de laboratório e os industriais são maiores do que os desvios observados para o parâmetro k .

No entanto, a aplicação de tantos fatores de correção empíricos não torna o uso da metodologia prática. Por essa razão, buscou-se o desenvolvimento de ensaios a seco para a previsão do consumo específico de energia do circuito estudado.

4.2 ENSAIOS PARA A INVESTIGAÇÃO DAS VARIÁVEIS RELEVANTES AO ENSAIO DE LABORATÓRIO

4.2.1 Definição do *top size* da carga de bolas

Para o desenvolvimento dos ensaios de moagem a seco, investigou-se a influência de diferentes composições de cargas de bolas na geração de finos por faixa granulométrica. Realizaram-se ensaios com cinco diferentes cargas de bolas, nos quais se aumentou gradativamente a participação de bolas de 50 mm – entre 0% (*top size* da carga de 40 mm) a 25%. A Tabela 20 exhibe as taxas de quebra – que correspondem ao parâmetro k , calculado por faixa granulométrica – para cada ensaio. A Figura 32 exhibe graficamente os mesmos resultados.

Tabela 20 – Taxas de quebra por faixa granulométrica para diferentes composições de cargas de bolas

Tamanho da amostra (mm)	Taxas de quebra/Porcentagem de bolas de 50 mm				
	0%	10%	15%	20%	25%
5,00	0,064	0,085	0,07	0,078	0,077
3,15	0,072	0,092	0,079	0,085	0,089
1,00	0,085	0,104	0,091	0,097	0,103
0,500	0,089	0,108	0,095	0,101	0,107
0,045	0,067	0,042	0,037	0,043	0,042

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 32 - Taxas de quebra para diferentes composições de cargas de bolas. Fonte: arquivo pessoal da autora.

A carga de bolas de 40 mm foi a que apresentou a maior geração de finos (porcentagem passante em 45 μ m), mas a menor taxa de quebra (menor k) nas frações grossas. Por outro lado, a carga com 10% de bolas de 50 mm apresentou as melhores taxas nas frações grosseiras (maior k) e taxas similares à da carga com 20% nas frações finas. Para atingir as estritas especificações granulométricas para o produto da moagem nas usinas de pelotização, tanto a quebra das frações grosseiras quanto a geração de finos são importantes. Desse modo, de acordo com os ensaios exploratórios, a carga de bolas mais adequada seria aquela com 10% de bolas de 50 mm.

A Tabela 21 compara os resultados globais dos ensaios de laboratório com os resultados industriais (referentes à média dos dados observados nos três moinhos industriais no período em que a amostra foi coletada). A Figura 33 e a Figura 34 ilustram os mesmos resultados.

Tabela 21 – Ensaios exploratórios variando a carga de bolas

Carga	% 50 mm	k laboratório (global)	BSA/kWh/t laboratório (global)	k lab/ind	BSA/kWh/t lab/ind
1	0	0,067	97,8	1,39	1,13
2	10	0,043	77,8	0,89	0,90
3	15	0,037	67,8	0,77	0,78
4	20	0,038	63,2	0,79	0,73
5	25	0,042	62,6	0,87	0,72

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 33 - Parâmetro k x carga de bolas. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 34 - Parâmetro BSA/kWh/t x carga de bolas. Fonte: arquivo pessoal da autora.

A Figura 33 e a Figura 34 mostram uma clara dependência dos parâmetros k e BSA/kWh/t em relação à composição da carga de bolas para os dados avaliados. Esses resultados vêm ao encontro das referências na literatura de que uma carga com maior área superficial (mais fina) tende a gerar maior quantidade de finos.^{52,49,53} Além disso, confirmam as curvas mostradas na Figura 32, na qual diferentes composições de carga de bolas mostram parâmetros de quebra distintos.

4.2.2 Relação volume de amostra e de interstícios da carga

À luz do que foi estudado na literatura especializada, investigou-se a influência da relação entre o volume de amostra e o volume de interstícios da carga de bolas nos resultados dos ensaios de laboratório a seco. Na prática, como todos os ensaios foram realizados com a mesma amostra e a composição da carga de bolas também permaneceu constante, foram adotadas diferentes massas de amostras em cada ensaio. A Tabela 22, a Figura 35 e a Figura 36 resumem os resultados.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios variando a massa de amostra

Volume de amostra/volume de interstícios da carga de bolas	Massa de amostra (kg)	k laboratório	BSA/kWh/t laboratório	k laboratório/industrial	BSA/kWh/t laboratório/industrial
1,1	5,7	0,07	121,1	1,32	1,25
1	5,34	0,06	117,1	1,19	1,21
0,8	4,27	0,06	116,9	1,19	1,21
0,6	3,20	0,04	78,1	0,75	0,81
0,4	2,14	0,03	62,7	0,49	0,65

Fonte: arquivo pessoal da autora

Figura 35 - Parâmetro k x massa amostra/volume vazios da carga. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 36 - Parâmetro BSA/kWh/t x massa amostra/volume vazios da carga. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Os dados indicam haver uma relação entre o volume de amostras, os vazios da carga de bolas e os parâmetros k e BSA/kWh/t. À medida que a relação volume de amostra/volume de interstícios diminui, ambos os parâmetros (k e BSA/kWh/t) também diminuem. Desse modo, os ensaios exploratórios corroboram os estudos encontrados na literatura especializada de que a relação entre o volume de amostra e de interstícios da carga de bolas é importante na definição dos resultados de ensaios de moagem de laboratório. A definição da relação ideal para os ensaios aqui desenvolvidos foi estudada com a ferramenta projeto de experimentos fatorial.

4.2.3 Validação da equação de Rowland

Os ensaios de moagem no moinho de torque do LTM-EPUSP foram realizados com o intuito de validar a equação de Rowland para o cálculo da potência de moinhos de laboratório. Os valores de energia observados no moinho de torque foram comparados com os valores calculados pela supracitada equação. A Tabela 23 e a Figura 37 resumem os resultados.

Tabela 23 – Resultados dos ensaios com moinho de torque

Ensaio	%IOCJ	%PFPT	Tempo de moagem (min)	Energia medida (kWh/t)	Energia calculada (kWh/t)
1	20	80	8	3,7	3,4
2	20	80	16	7,5	6,9
3	20	80	30	14	12,9
4	15	85	43	21	19,3
5	25	75	43	19,3	19,3
6	30	70	43	19,3	19,3
7	35	65	43	19,3	19,3

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 37 – Consumo de energia medido no moinho de torque x calculado. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Os dados indicam boa aproximação entre os resultados: o desvio médio entre os resultados foi de 5%, e o máximo, de 8%. Os resultados reforçam o uso da equação de Rowland para a previsão da potência de moinhos de laboratório no contexto estudado.

4.3 PROJETO DE EXPERIMENTOS

A ferramenta de projeto de experimentos fatorial foi utilizada para definir as condições ótimas para os ensaios de moagem a seco, à luz dos resultados exploratórios. A Tabela 24 a seguir resume os dados industriais relativos à amostra

obtida para a realização dos ensaios, que correspondem à média observada para esses parâmetros durante o período de amostragem.

Tabela 24 - Dados industriais relativos à amostra coletada para o projeto de experimentos

Consumo específico de energia (kWh/t)	21,6
Porcentagem passante em 45 µm no produto do circuito	85%
Superfície específica do produto do circuito (cm ² /g)	2650

Fonte: arquivo pessoal da autora.

O mesmo consumo específico de energia observado industrialmente foi aplicado aos ensaios. O valor de consumo de energia apresentado na Tabela 24 corresponde à energia total, medida no eixo pinhão dos moinhos durante o período de amostragem. A Tabela 25 resume os resultados dos ensaios.

Tabela 25 – Resultados dos ensaios do projeto de experimentos

Ensaio	Porcentagem de bolas de 50 mm	Volume de amostra/volume de vazios	Porcentagem passante em 45 µm no produto	Superfície específica no produto (cm ² /g)
1	25	0,4	78,1	2.260
2	25	1,1	79,8	2.370
3	0	1,1	80,9	2.560
4	25	0,4	78,9	2.280
5	25	1,1	79,6	2.310
6	0	0,4	82,1	2.640
7	0	1,1	80,6	2.550
8	0	0,4	81,2	2.550

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Como se pode notar, o produto de todos os ensaios ficou mais grosseiro do que o observado no circuito industrial (85% passante em 45 µm), mesmo quando aos ensaios se aplicou o mesmo nível de energia correspondente aos dois compartimentos dos moinhos industriais. Desse modo, os resultados indicam que a moagem a seco de laboratório é menos eficiente do que a moagem industrial, ou seja, o consumo específico de energia em laboratório é superior ao industrial. A literatura especializada corrobora essa observação ao afirmar que:

- os ensaios de laboratório são realizados em bateladas, o que elimina o efeito positivo da carga circulante quanto à geração de finos;^{37,39,40,41,49}
- à medida que o diâmetro do moinho aumenta, o consumo específico de energia diminui;³¹

- nos moinhos de laboratório, o mecanismo de quebra por impacto se sobrepõe à quebra por atrição,⁶⁸ o que pode mascarar os resultados para a moagem fina, na qual esse segundo mecanismo é mais importante.

Os ensaios de validação poderão ajudar a confirmar esse comportamento.

A Figura 38 e a Figura 39 mostram os gráficos de Pareto para as variáveis de resposta avaliadas no projeto de experimentos.

Figura 38 - Gráfico de pareto para a resposta superfície específica. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 39 - Gráfico de pareto para a resposta percentagem passante em 45 μm . Fonte: arquivo pessoal da autora.

A Figura 38 mostra que a variável carga de bolas e a interação entre as variáveis carga de bolas e a relação volume de amostra/volume de vazios da carga foram significativas para a geração de superfície específica. A variável volume de

amostra/volume de vazios da carga não foi significativa, o que contradiz os resultados dos ensaios exploratórios. Analogamente, a Figura 39 mostra que a variável carga de bolas e a interação entre as variáveis carga de bolas e a relação volume de amostra/volume de vazios da carga foram significativas para a geração de finos (porcentagem passante na malha de 45 μm). Também nesse caso a variável volume de amostra/volume de vazios da carga não foi significativa para a resposta, o que contradiz os ensaios exploratórios.

Como todos os ensaios de moagem do projeto de experimentos foram realizados pelo mesmo técnico de laboratório, seguindo os mesmos procedimentos, uma hipótese para os resultados diferentes dos ensaios exploratórios pode ser a qualidade da amostra utilizada. Tanto as amostras utilizadas nos ensaios exploratórios quanto a amostra empregada nos ensaios do projeto de experimentos podem refletir erros de amostragem e/ou de preparação. Esse aspecto pode ser confirmado na etapa de validação dos ensaios, já que diversas amostras foram usadas.

Para a escolha do “ponto ideal” para as variáveis significativas, avaliadas com o projeto de experimentos, foram utilizadas as regressões lineares, calculadas a partir dos resultados dos experimentos. A regressão obtida para a resposta porcentual passante na malha de 45 μm é apresentada a seguir.

Equação obtida:

$$\%<0,045 = 82,666 - 0,1930\text{Carga bolas} - 1,714\text{Amostra/vazios} + 0,1366\text{Carga bolas*Amostra/vazios}$$

(Equação 23)

Resumo dos parâmetros do modelo:

- a) $S = 0,312570$;
- b) $R^2 = 97.11\%$;
- c) $R_{adj}^2 = 94,94\%$.

Analogamente, para a resposta superfície específica, a regressão obtida foi:

$$\begin{aligned} \text{Superfície específica} = & 2657,1 - 17,09 \text{ Carga bolas} - 92,9 \text{ Amostra/vazios} \\ & + 7,71 \text{ Carga bolas*Amostra/vazios} \end{aligned}$$

(Equação 24)

Resumo dos parâmetros do modelo:

- a) $S = 26,6927$;
- b) $R^2 = 98,34\%$;
- c) $R_{adj}^2 = 97,09\%$.

Com os modelos calculados no projeto de experimentos, estimaram-se as melhores condições do ensaio de laboratório, de modo que se obtivessem os resultados o mais próximos possível do produto industrial correspondente ao período em que a amostra foi coletada. Para tanto, utilizou-se a ferramenta gráfica de superfícies de contorno, em que cada linha corresponde a todos os pontos nos quais a variável de resposta permanece constante. A Figura 40 e a Figura 41 mostram os resultados.

Figura 40 – Gráfico de superfície de controle para o parâmetro superfície específica. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 41 – Gráfico de superfície de controle para o parâmetro percentagem passante na malha de 45 µm. Fonte: arquivo pessoal da autora.

A Figura 40 mostra que a superfície específica no produto dos moinhos industriais (2650 cm²/g), correspondente à amostra coletada, só seria atingida com uma faixa muito estreita de carga de bolas, próxima de 0% de bolas de 50 mm (*top size* de 40 mm). Por outro lado, a relação volume de amostra/volume de vazios ideal se encontra abaixo de 0,6.

Como mencionado, em nenhum dos ensaios relativos ao projeto de experimentos foi atingida a mesma granulometria do produto dos moinhos industriais. De acordo com o modelo, porém, produtos mais finos são atingidos com as mesmas condições estabelecidas para a geração de superfície.

Contudo, a Tabela 26 mostra que, de acordo com o modelo estatístico obtido, a variação na relação volume de amostra/volume de vazios não acarreta grandes diferenças nos resultados de laboratório em comparação com os dados industriais.

Tabela 26 – Simulações de resultados de laboratório

Volume de Amostra/volume de vazios	Porcentagem bolas 50 mm	Resultados estimados para laboratório		Resultados industrial/ laboratório	
		Superfície específica (cm ² /g)	Porcentagem passante em 45 µm	Superfície específica (cm ² /g)	Porcentagem passante em 45 µm
0,4	0	2620	82,0	1,01	1,04
0,6	0	2601	81,6	1,02	1,04
0,8	0	2583	81,3	1,03	1,05
0,4	5	2550	81,3	1,04	1,05
0,6	5	2539	81,1	1,04	1,05
0,8	5	2528	80,9	1,05	1,05

Fonte: arquivo pessoal da autora.

A massa de amostra é um importante parâmetro para os ensaios de laboratório: massas muito pequenas trazem mais dificuldades quanto à sua representatividade nas frações grosseiras e quanto à manipulação da amostra, pois eventuais perdas no processo tornam-se mais significativas. Por outro lado, o ensaio a seco traz dificuldades extras em relação ao ensaio a úmido: a etapa de descarregamento do jarro facilita a perda de finos, e o fenômeno natural de *coating* da carga de bolas, também observado em laboratório, dificulta a sua limpeza após o ensaio.

Combinando-se, então, os resultados da Tabela 26 e os aspectos práticos da execução do ensaio, optou-se por utilizar uma relação volume de amostra/vazios da carga de 0,8 correspondente a uma massa de amostra aproximada de 4,3 kg.

A Tabela 27 resume, portanto, as condições estabelecidas para os ensaios de moagem a seco e adotadas na fase de validação.

Tabela 27 – Condições definidas para os ensaios a seco	
Variável	Condição
Dimensões do moinho	12 x 12 pol (0,3048 x 0,3048 m)
Ensaio	A seco
% Velocidade crítica	70,6% (58 rpm)
Massa de amostra	4,27 kg
Carga de bolas	30 kg, escalonada entre 40 e 15 mm

Fonte: arquivo pessoal da autora.

4.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Os ensaios de validação foram realizados para verificar se as condições estabelecidas com o auxílio da ferramenta projeto de experimentos são adequadas para a previsão e o controle do circuito industrial de moagem a seco. Desse modo, efetuaram-se diversos ensaios seguindo as condições apresentadas na Tabela 27, com amostras coletadas na alimentação do circuito industrial, no período de junho a dezembro de 2018.

A Tabela 28, a Figura 42 e a Figura 43 resumem os resultados para os parâmetros k e BSA/kWh/t.

Tabela 28 – Parâmetros k e BSA/kWh/t para os ensaios de validação

Período	Resultados de laboratório		Resultados industriais	
	k	BSA/kWh/t	k	BSA/kWh/t
Junho 1-15	0,046	77,3	0,062	101,7
Junho 16-30	0,043	78,7	0,061	100,3
Julho 1-15	0,046	67,2	0,062	93,8
Julho 16-31	0,042	69,2	0,063	95,9
Agosto 1-15	0,044	72	0,068	95,9
Agosto 16-31	0,041	78,2	0,062	103,4
Setembro 1-8	0,042	64,6	0,059	101,5
Setembro 16-20	0,042	78,7	0,064	107,3
Setembro 23-29	0,044	77,9	0,056	102,9
Setembro 30 - Outubro 06	0,048	69,1	0,06	103,2
Outubro 07-13	0,048	67,9	0,064	95,5
Outubro 14-20	0,048	55,7	0,066	75,7
Novembro 04-10	0,041	97,9	0,064	108,1
Novembro 18-24	0,041	102,8	0,059	121,5
Novembro 25-Dezembro 01	0,045	70,9	0,064	104,8
Dezembro 02-08	0,043	78,6	0,062	96,5
Dezembro 09-15	0,044	85,7	0,065	102,6
Dezembro 16-31	0,045	93,6	0,064	110,3

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 42 – Ensaios de validação: comparação do parâmetro k.

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 43 - Ensaio de validação: comparação do parâmetro BSA/kWh/t.
Fonte: arquivo pessoal da autora.

Os resultados de laboratório foram consistentemente inferiores aos observados no circuito industrial, tanto para o parâmetro k quanto para o parâmetro BSA/kWh/t. Além disso, os desvios dos dados de laboratório em relação aos industriais são muito superiores aos estimados no projeto de experimentos. Por outro lado, as variáveis de resposta analisadas no projeto de experimentos não foram os parâmetros k e BSA/kWh/t, mas as características do produto dos moinhos, ou seja, a porcentagem passante em 45 μm e a superfície específica (cm^2/g). Desse modo, para auxiliar na análise dos resultados, foram calculadas a porcentagem passante na malha de 45 μm e a superfície específica no produto do moinho de laboratório para os mesmos níveis de energia observados no circuito industrial. Esses parâmetros foram calculados a partir das curvas de moagem obtidas nos ensaios, com base no consumo específico médio de energia observado industrialmente. A Tabela 29, a Figura 44 e a Figura 45 mostram os resultados.

Tabela 29 – Porcentagem passante em 45 μm e superfície específica no produto do moinho para os ensaios de validação

Período	Dados de laboratório		Dados industriais	
	Porcentagem passante em 45 μm	Superfície específica (cm^2/g)	Porcentagem passante em 45 μm	Superfície específica (cm^2/g)
Junho 1-15	78	2372	82,4	2630
Junho 16-30	78,6	2385	83,3	2628
Julho 1-15	80,9	2096	83,6	2511
Julho 16-31	80,9	2160	84	2531
Agosto 1-15	78,5	2199	84,9	2483
Agosto 16-31	77,5	2401	83,3	2740
Setembro 1-8	79	2103	83,2	2746
Setembro 16-20	76,5	2150	83,2	2625
Setembro 23-29	80,6	2557	82,5	2733
Setembro 30 - Outubro 06	79,3	2019	82,5	2627
Outubro 07-13	79,7	2122	83,2	2466
Outubro 14-20	83,3	1980	86	2172
Novembro 04-10	75,1	2907	82,1	2746
Novembro 18-24	73,8	3187	80,6	3051
Novembro 25-Dezembro 01	77,1	2226	82	2635
Dezembro 02-08	77,8	2267	83,4	2589
Dezembro 09-15	77,7	2596	83,2	2656
Dezembro 16-31	76,3	2849	81,5	2794

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 44 - Ensaios de validação: comparação do parâmetro porcentagem passante em 45 μm .
Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 45 - Ensaios de validação: comparação da superfície específica.
Fonte: arquivo pessoal da autora.

As diferenças entre os resultados de laboratório e os industriais se tornam menores quando se comparam diretamente as características do produto em vez dos parâmetros k e BSA/kWh/t. Quanto à geração de finos (porcentagem passante em $45\ \mu\text{m}$), o desvio máximo entre os dados de laboratório e os industriais foi de 5%, uma aproximação muito significativa para o uso da ferramenta no controle do circuito industrial.

Quanto à geração de área superficial, contudo, a diferença é superior. Embora a maior parte dos pontos esteja dentro do desvio máximo de 15%, anteriormente estipulado como limite, alguns ensaios apresentaram desvios muito superiores em relação aos dados industriais.

A superfície específica é crucial para a garantia da qualidade das pelotas e dos custos operacionais; portanto, é desejável que os ensaios de laboratório forneçam maior previsibilidade desse parâmetro. Algumas possíveis razões para os maiores erros quanto à previsão da geração de área superficial no produto dos moinhos são:

- a inconsistência entre as características da amostra e da alimentação dos moinhos industriais: as alíquotas são coletadas no transportador de correia de alimentação dos moinhos, onde os materiais IOCJ e PFPT não são homogeneamente distribuídos. Apesar de cada alíquota se referir à coleta de três pontos diferentes no transportador de correia, tal amostragem pode induzir a erros, especialmente no que concerne à representatividade da fração de IOCJ. Embora existam procedimentos e ferramentas padronizadas para a amostragem,

esses erros são inerentes à natureza do material e do ponto disponível para coleta. O fato de as amostragens serem conduzidas por equipes de diferentes turnos também pode acrescentar erros;

- o fato de o *top size* da amostra não ser controlado: os ensaios de laboratório utilizam bolas menores do que os moinhos industriais, o que dificulta a quebra das frações grosseiras da amostra;
- as análises de rotina da superfície específica: conforme exposto anteriormente, as amostras do produto do circuito industrial são coletadas automaticamente; porém, a análise no permeâmetro Blaine demanda consistência nos procedimentos e cuidados com a amostra.

Para investigar esses aspectos, o primeiro passo foi avaliar as variâncias entre os resultados de laboratório e os industriais: a Figura 46 mostra que as variâncias para os resultados de laboratório são semelhantes aos resultados industriais para o parâmetro porcentagem passante em 45 μm . Por outro lado, a Figura 47 mostra que a variância dos resultados de laboratório é superior aos resultados industriais para o parâmetro superfície específica.

Quando se comparam as variâncias entre os dados de laboratório e os industriais para parâmetros relativos ao produto dos moinhos, a menor variância dos dados industriais pode ser explicada devido ao fato de o circuito industrial ser fechado: a carga circulante auxilia na diluição das variações inerentes ao processo; por outro lado, os ensaios são feitos em bateladas e, portanto, essas variações não são facilmente absorvidas.

Figura 46 - Comparação entre as distribuições de dados industriais e de laboratório para o parâmetro percentagem passante na malha de 45 μ m no produto do moinho. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 47 - Comparação entre os desvios padrão dos dados industriais e de laboratório para a superfície específica no produto do moinho. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Por outro lado, a Figura 48 e a Figura 49 comparam as variâncias nas características da alimentação do circuito industrial com as características das amostras de alimentação dos ensaios de moagem.

Figura 48 - Comparação entre variância dos dados industriais e de laboratório para o parâmetro percentagem passante em 45 μm na alimentação do moinho. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 49 - Comparação entre a variância dos dados industriais e de laboratório para a superfície específica na alimentação do moinho. Fonte: arquivo pessoal da autora.

É possível notar que os dados referentes aos ensaios de laboratório apresentam maior variação tanto para o parâmetro porcentagem passante em 45 μ m quanto para a superfície específica. Como as amostras de alimentação dos ensaios são obtidas no mesmo local e seguindo os mesmos procedimentos que as amostras coletadas rotineiramente para o controle da granulometria de alimentação do circuito industrial, a diferença entre as variâncias de ambos os dados não se justifica. Por outro lado, os parâmetros operacionais dos moinhos industriais, como o controle da carga circulante e da velocidade de rotação dos separadores, parecem confirmar que as características da alimentação dos moinhos industriais variam em uma faixa mais ampla do que mostram os dados de rotina. Para ilustrar esse ponto, a Figura 50 mostra a variação desses parâmetros no período dos ensaios de validação. Nesse gráfico foram descontados os períodos relativos à parada de equipamentos.

Figura 50 – Médias diárias para parâmetros industriais dos moinhos durante o mesmo período dos ensaios de validação.

Essa comparação reforça a hipótese de que os procedimentos de amostragem e/ou análise de rotina do laboratório podem ser uma fonte dos desvios observados entre os ensaios de moagem e os dados industriais.

Uma vez que os parâmetros k e $BSA/kWh/t$ industriais são calculados a partir de apenas dois pontos, a saber, o produto final do circuito e sua alimentação nova, as diferenças observadas entre as características da alimentação do circuito industrial e das amostras dos ensaios de laboratório também auxiliam a explicar a razão dos erros significativos entre dados de laboratório e industriais para esses parâmetros.

Para investigar a influência dos erros relativos à tomada de amostras nos resultados dos ensaios de validação, parte deles foi realizada mediante a alteração do método de composição das amostras: coletas diárias por um único operador, em substituição às amostragens de rotina, feitas por diferentes operadores das equipes de turno. Embora essa solução não seja aplicável em longo prazo, pois não há disponibilidade de um mesmo técnico de laboratório realizar as amostragens todos os dias, caso a influência da amostragem seja confirmada, os dados podem subsidiar medidas de controle dos procedimentos de rotina no laboratório da planta. Essa alteração foi realizada no período entre 1º de setembro e 13 de outubro. A Figura 51 e a Figura 52 mostram os resultados.

Figura 51 – Diferenças entre dados de laboratório e industriais antes e depois de alteração nas amostragens - porcentagem passante em 45 µm. Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 52 – Diferenças entre dados de laboratório e industriais antes e depois de alteração nas amostragens - Superfície específica. Fonte: arquivo pessoal autora.

A Figura 51 ilustra que os intervalos de dados para os desvios entre os resultados de laboratório e industriais quanto ao percentual passante em 45 µm não se alteraram significativamente após a mudança nas amostragens (amostragem com um único operador). A variação entre os desvios médios para ambos os períodos também não foi expressiva. Por outro lado, a Figura 52 mostra que o desvio médio entre a superfície específica de laboratório e a industrial cresceu ligeiramente após a alteração nas amostragens (cerca de quatro pontos percentuais) e a variância dos dados aumentou significativamente. Ao contrário das amostragens de rotina, porém,

todas as amostragens realizadas para os ensaios de moagem foram supervisionadas e seguiram todos os procedimentos.

Desse modo, a unificação do operador das amostragens não contribuiu para a maior aproximação entre os dados de laboratório e os dados industriais. Se os erros de amostragens contribuem para essa diferença – como se estima que contribuam –, eles são associados a desvios distintos do erro inerente às trocas de operador. De fato, conforme discutido no item 3.1, o próprio local de obtenção da amostra referente à alimentação dos moinhos não é ideal, e a dinâmica operacional da usina impõe restrições à execução de procedimentos que sigam as teorias de amostragem de maneira consistente. Por outro lado, essa confirmação demonstra que a rotina de amostragens (com diferentes operadores de turno) não influencia negativamente no uso da ferramenta aqui proposta.

O passo seguinte para investigar a influência das características da alimentação dos ensaios de moagem em seu resultado foi a condução de ensaios controlando-se o *top size* da amostra. Esses ensaios foram realizados durante cinco semanas, após a manutenção programada da planta industrial em setembro. Nesse intervalo, dois ensaios foram conduzidos com cada amostra. O primeiro, com a realização prévia de um escalpe na malha de 8 mm, e o segundo, com a amostra com distribuição granulométrica natural (ou seja, seguindo o procedimento original). A Tabela 30 e a Tabela 31 resumem os resultados dos ensaios.

Tabela 30 – Ensaios escalpando-se a alimentação – porcentagem passante em 45 μ m

Período	Porcentagem passante em 45 μ m no produto do moinho			Porcentagem passante em 45 μ m no laboratório/industrial	
	Ensaio com escalpe	Ensaio sem escalpe	Industrial	Ensaio com escalpe	Ensaio sem escalpe
Setembro 16-20	79	77	83	95%	92%
Setembro 23-29	82	81	83	100%	98%
Setembro 30 - Outubro 06	81	79	83	98%	96%
Outubro 07-13	81	80	83	98%	96%
Outubro 14-20	84	83	86	97%	97%

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Tabela 31 – Ensaios escalpando-se a alimentação – superfície específica

Período	Superfície específica no produto do moinho (cm ² /g)			Superfície específica no laboratório/industrial	
	Ensaio com escalpe	Ensaio sem escalpe	Industrial	Ensaio com escalpe	Ensaio sem escalpe
Setembro 16-20	2133	2150	2625	81%	82%
Setembro 23-29	2493	2557	2733	91%	94%
Setembro 30 - Outubro 06	2089	2019	2627	80%	77%
Outubro 07-13	2068	2122	2466	84%	86%
Outubro 14-20	1938	1980	2172	89%	91%

Fonte: arquivo pessoal da autora.

A Tabela 30 mostra que a porcentagem passante em 45 µm no produto dos ensaios com escalpe foi muito semelhante à dos ensaios sem escalpe: as médias foram, respectivamente, de 81% e 80%. Por sua vez, os erros médios em relação aos dados industriais foram, respectivamente, de 3% e 4% para os ensaios com e sem escalpe. De maneira análoga, nota-se na Tabela 31 que as superfícies específicas médias no produto dos ensaios com escalpe e sem escalpe foram, respectivamente, de 2144 cm²/g e 2166 cm²/g. Por outro lado, os erros médios entre os produtos dos ensaios com e sem escalpe em relação aos dados industriais foram, respectivamente, de 15% e 14%.

Os dados apresentados corroboram a hipótese de que os ensaios de laboratório não são sensíveis ao controle de *top size* da amostra, ao menos quando as amostras se encontram dentro das faixas de granulometria comuns à operação do circuito avaliado, como foi o caso no período estudado. Assim, optou-se por continuar a realização dos ensaios sem a etapa de escalpe, que na prática constitui um complicador para a sua execução.

Esses resultados, porém, levantam dúvidas quanto à sensibilidade dos ensaios de laboratório em relação à distribuição granulométrica global das amostras em sua alimentação. Para investigar esse aspecto, foram realizados ensaios com três diferentes distribuições granulométricas, compostas a partir de uma única amostra. A Figura 53 mostra as distribuições granulométricas das amostras compostas para os ensaios.

Figura 53 - Distribuições granulométricas das amostras compostas para o teste de sensibilidade à granulometria de alimentação dos ensaios. Fonte: arquivo pessoal da autora.

A Figura 54 mostra a relação entre a porcentagem passante na malha de 0,045 na alimentação e no produto dos ensaios.

Figura 54 - Relação entre a granulometria de alimentação dos ensaios e a do produto. Fonte: arquivo pessoal da autora.

O número de pontos lançados no gráfico da Figura 54 não permite avaliar se há significância estatística entre a relação das duas variáveis, mas é possível observar uma relação positiva entre a granulometria de alimentação e a do produto dos ensaios. Por outro lado, a mesma figura mostra que, ao se variar a porcentagem passante em 45 μ m na alimentação do ensaio, a variação da granulometria no produto do ensaio é pequena.

Analogamente, a Figura 55 mostra a relação entre a porcentagem passante na malha de 45 µm na alimentação dos ensaios e a superfície específica em seu produto.

Figura 55 - Relação entre a granulometria de alimentação dos ensaios e a superfície específica no produto. Fonte: arquivo pessoal autora.

A relação entre a granulometria de alimentação do ensaio e a geração de superfície específica no produto é mais forte do que a demonstrada para o parâmetro porcentagem passante na malha de 45 µm (Figura 54), porém com a surpreendente correlação negativa: supostamente, uma amostra inicial mais fina geraria um produto mais fino para os mesmos níveis de energia aplicados; portanto, também com maior área superficial. Contudo, nesses ensaios, a amostra mais grosseira resultou em maior superfície específica no produto do ensaio, enquanto a amostra mais fina resultou em menor superfície específica no produto do ensaio.

As granulometrias de alimentação desses ensaios foram “construídas” a partir de uma única amostra, com o intuito de eliminar a influência de outros parâmetros nos resultados, tais como a composição mineralógica. No entanto, durante a composição das amostras, ficou claro que isso não é possível na prática, como demonstra a Figura 56.

Figura 56 – Fotos da amostra original para os ensaios de sensibilidade dividida por faixas granulométricas.

Fonte: arquivo pessoal da autora.

Nota-se pela Figura 56 que o IOCJ (de coloração avermelhada) se concentra nas frações grosseiras, enquanto o PFPT (de coloração azulada) é essencialmente fino. Uma amostra mais grosseira constitui-se, portanto, de uma amostra com maior porcentagem de IOCJ, que, como já discutido, é um gerador natural de nova área superficial na moagem. É possível observar essa demarcação também nos transportadores de correia de alimentação do circuito industrial. Isso significa que um aumento na granulometria de alimentação do circuito normalmente se traduz num aumento da participação de IOCJ e no consequente aumento de superfície específica do produto.

Para confirmar a maior participação de IOCJ à medida que a granulometria de alimentação aumenta, foram realizadas análises mineralógicas nas três amostras compostas para os ensaios de sensibilidade à alimentação. A Figura 57 mostra os resultados.

Figura 57 – Distribuição dos tipos de hematita por amostra.
(Fonte: arquivo pessoal da autora.)

Observa-se que, entre os minerais de ferro, a amostra mais grosseira contém participação de hematita microcristalina que, conforme apontado no item 2.6, é um mineral típico do IOCJ. Pela mesma figura, também é possível notar que a participação de hematita microcristalina entre os minerais de ferro diminui com a granulometria da amostra. Os resultados apresentados na Figura 57 ajudam a elucidar a dificuldade de prever em laboratório o comportamento do circuito industrial estudado quanto à geração de área superficial: quaisquer variáveis relativas aos ensaios são estudadas utilizando-se apenas uma amostra, na tentativa de avaliar cada parâmetro isoladamente. Contudo, é possível que cada resultado seja reproduzível somente para a mesma faixa de IOCJ que a amostra representa, especialmente no que concerne à geração de área superficial.

Para ilustrar essa análise, os resultados dos ensaios realizados na fase de validação foram divididos de acordo com a participação de IOCJ no momento da amostragem. A Figura 58 mostra os resultados. Apesar de serem poucos dados por grupo, é visível que a geração de área de superfície e de finos em laboratório é diferente para altas percentagens de IOCJ (superiores a 30%).

Figura 58 - Resultados dos ensaios de laboratório x participação de IOCI.
Fonte: arquivo pessoal da autora.

Por fim, convém destacar que, embora a superfície específica obtida nos ensaios de laboratório apresente desvios em relação à industrial, a relação linear proposta por Rittinger entre o consumo específico de energia e a geração de superfície foi observada em todos os ensaios de validação do método proposto, o que significa que essa relação linear também pode ser aplicada à moagem a seco, como mostra a Figura 59.

Figura 59 – Relação linear entre superfície específica e consumo específico de energia.
Fonte: arquivo pessoal da autora.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a aplicação do ensaio de moagem proposto por Donda para a previsão do consumo específico de energia de circuitos de moagem a seco. Além disso, estudaram-se variáveis de ensaios de moagem em laboratório para o controle operacional de circuitos de remoagem a seco e propôs-se um método a seco como ferramenta.

Em relação à aplicação do método de laboratório proposto por Donda, para o circuito industrial estudado os ensaios propostos não foram capazes de prever o comportamento industrial tanto para a geração de finos quanto para a geração de superfície.

No que concerne aos ensaios de laboratório a seco, foi demonstrado que tanto a composição da carga de bolas quanto a relação entre o volume de amostra e o volume de interstícios da carga são variáveis relevantes nos resultados de laboratório.

Quanto ao método de ensaio a seco proposto, os ensaios de laboratório foram capazes de prever a geração industrial de finos com um desvio máximo de 5%. Embora uma base de dados mais robusta seja necessária para a completa validação do método proposto, os ensaios representaram um período de operação de seis meses do circuito industrial, cobrindo diversas variações de processo, o que reforça a aplicação da ferramenta.

Os ensaios a seco também demonstraram que a equação proposta por Rowland para a previsão do consumo de energia em moinhos de laboratório se mostrou satisfatória para as condições aqui estudadas e se confirma como uma ferramenta prática para a execução de ensaios de moagem em laboratório.

Além disso, o comportamento linear entre consumo específico de energia e geração de superfície proposto por Rittinger foi observado em todos os ensaios realizados para a moagem a seco.

REFERÊNCIAS

1. ROWLAND, C. A. **Selection of Rod Mills, Ball Mills, Pebble Mills and Regrind Mills**. In: MULLAR, A. L; JERGENSEN, G. V. Design and installation of comminution circuits. New York: SME, 1982.
2. KANDA, Y.; ABE, Y.; YAMAGUCHI, M.; ENDO, C. **A fundamental study of dry and wet grinding from the viewpoint of breaking strength**. Powder Technology, n. 56, 1988.
3. PRYOR, E. J. **Mineral Processing**. Elsevier, 1985.
4. TAGGART, A. F. **Handbook of Mineral Dressing**. John Wiley and Sons, 1945.
5. ROWLAND, C.A. **Ball Mills**. In: WEISS, N. L. SME Mineral Processing Handbook, 1985.
6. FUERSTENAU, D. W.; SULLIVAN Jr., D. A. **Size distributions and energy consumption in wet and dry grinding**. AIME Transactions, 1962.
7. BOND, F. C.; AGTHE, F. T. **Deleterious coatings of the media in dry ball milling**. Mining Technology, 1940.
8. COMMITTEE ON COMMINUTION AND ENERGY CONSUMPTION. **Comminution and Energy Consumption**. Washington: National Material Advisory Board, 1981.
9. DUDA, W. **Manual tecnológico del cemento**. Tradução de Antonio Sarabia Gonzalez. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1977.
10. BENZER, H.; JANKOVIC, A.; ERGUN, L. **Cement clinker grinding practice and technology**. In: Advances in comminution. SME, 2006.
11. ATHAYDE, M.; MAYERHOFER, F.; PERES, M. E. **Vale challenges for pelletizing future**. In: COREM Symposium on Iron Ore Pelletizing, 4., 2018, Quebec. Resumos.
12. ROSA, C. R. A. **Desempenho de classificadores dinâmicos de partículas**. 2001. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
13. ZELLE, W. **Process technology: separators**. Holderbank cement seminar, 2000.
14. KANDA, Y.; KOTAKE, N. **Comminution energy and evaluation in fine grinding**. In: SALMAN, A. D.; GHADIRI, M.; HOUNSLOW, M. J. Handbook of Powder Technology. Elsevier, 2007.

15. WELLENKAMP, F. J. **Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1999.
16. ORUMWENSE, O. A.; FORSSBERG, E. **Superfine and ultrafine grinding – a literature survey**. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, n. 11, p. 107-127, 1992.
17. LICHTER, J. K. H.; DAVEY, G. **Selection and sizing of ultrafine and stirred grinding mills**. In: MULAR, A. L.; HALBE, D. N., DEREK, J. B. Mineral Processing plant design, practice and control. Littleton, SME, 2002. p. 783-800.
18. YOKAYAMA, T.; INOUE, Y. **Selection of fine grinding mills**. In: Handbook of powder technology. Elsevier, 2007.
19. HERBST, J. A.; LO CHANG, Y.; FLINTOFF, B. **Size reduction and liberation**. In: FUERSTENAU, M. C.; HAN, K. N. Principles of mineral processing. Littleton, SME, 2003.
20. ROSA, A. C; OLIVEIRA, P. S.; DONDA, J. D. **Comparing ball and vertical mills performance: an industrial case study**. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 2014. Anais: Santiago, 2014.
21. BERGERMAN, M. G. **Dimensionamento e simulação de moinhos verticais**. 2013. Tese (doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
22. SHI, F.; MORRISON, R.; CERVELLIN, A.; BURNS, F.; MISA, F. **Comparison of energy efficiency between ball mills and stirred mills in coarse grinding**. Minerals Engineering, n. 22, 2009.
23. BURFORD, B. D.; NIVA, E. **Comparing energy efficiency in grinding mills**. In: Metallurgical Plant Design and Operating Strategies, 2008. Anais: Perth, 2008.
24. PENA, F. **Vertimills – continuing results with wide ranging applications**. In: SME Annual Meeting, 1992. Anais: Phoenix, 1992.
25. JANKOVIC, A. **Developments in iron ore comminution and classification technologies**. In: LU, L. Iron ore. Elsevier, 2015.
26. RATHBURN, D. R.; MOK, J. K. **Fine dry grinding of iron ore for pelletizing**. AIME transactions, 1970.
27. ZHU, D.; PAN, J.; LU, L.; HOLMES, R.J. **Iron ore pelletization**. In: LIMING, LU. Iron ore – Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. Elsevier, 2015.
28. SASTRY, K. V. S.; PANIGRAPHY, S. C.; FUERSTENAU, D. W. **Effect of wet grinding and dry grinding on the batch balling behavior of particulate materials**. AIME transactions, vol. 262, 1977.

29. PAL, J.; GHORAI, S.; AGARWAL, S.; NANDI, B.; CHAKRABORTY, T.; DAS, G.; PRAKASH, S. **Effect of Blaine fineness on the quality of hematite iron ore pellets for blast furnace**. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review, n. 36, 2015.
30. FORSMO, S. P. E.; SAMSKOG, P. O.; BJORKMAN, B. M. T. **A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness**. Powder Technology, n. 181, p. 321-330, 2008.
31. ROWLAND, C. A. **The Tools of Power Power: the Bond Work Index, a tool to measure grinding efficiency**. In: Selection Circuits to Prepare Beneficiation Feeds. Allis Chalmers Bulletin, 1983.
32. GHADIRI, M.; KWAN, C. C.; DING, Y. **Analysis of milling and the role of feed properties**. In: Handbook of powder technology. Elsevier, 2007.
33. LYNCH, A. J. **Mineral Crushing and grinding circuits: their simulation, optimization, design and control**. Amsterdam: Elsevier, 1979.
34. CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem**. São Paulo: Signus Editora, 2009. v. 3.
35. DONDA, J. D. **Estudo do comportamento de um itabirito do Quadrilátero Ferrífero quanto à superfície**. 1998. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
36. RABELO, P. J. B.; DONDA, J.D.; PERES, A.E.C.; CHAVES, A.P. **Rittinger, 1,4 séculos depois: uma demonstração de sua aplicação a uma instalação industrial**. Metalurgia e materiais, v. 63, 2007.
37. BOND, F. C.; MAXSON, W. L. **Standard grindability tests and calculations**. Mining Technology, 1943.
38. BAKKER, J. **Energy use of fine grinding in mineral processing**. Metallurgical and Materials Transactions, ASM, 2014.
39. DOLL, A.; BARRAT, D. **Grinding: why so many tests?** In: 43RD ANNUAL MEETING OF THE CANADIAN MINERAL PROCESSORS, 2011. Anais: Ontario, 2011.
40. MOSHER, J.; BIGG, T. **Bench scale and pilot plant tests for comminution circuit design**. In: MULAR, A. L.; HALBE, D. N.; DEREK, J. B. Mineral Processing plant design, practice and control. Littleton, SME, 2002. p. 123-135.
41. MCKEN, A.; WILLIAMS, S. **An overview of the small-scale test procedures available to characterize ore grindability**. In: INTERNATIONAL AUTOGENOUS AND SEMIAUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY CONFERENCE, 2006. Anais: Vancouver, 2006. v. 4.

42. LEVIN, J. **Observations on the Bond standard grindability test and a proposal for a standard grindability test for fine materials.** Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1989.
43. HOLDERBANK CEMENT SEMINAR – PROCESS TECHNOLOGY: COMMINUTION ENGINEERING. Holderbank Management & Consulting, 2000.
44. BOGREN E. C.; WAKEMAN J. S. **The Design, Performance and Application of a Batch Grinding System.** In: 62ND ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. Washington D. C., 1969.
45. DONDA, J. D.; GALINARI C. M.; RABELO, P. J. B. **O Controle da Eficiência Energética nos Circuitos de Pré-moagem e Moagem Primária da Samarco Mineração.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO – ABM, 1999. Anais: São Paulo, ABM, 1999. p. 144-150.
46. DONDA, J. D. **Um método para prever o consumo específico de energia na (re)moagem de concentrados de minérios de ferro em moinhos de bolas.** 2003. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
47. DONDA, J. D.; ROSA, A. C. **A lei de moagem: comprovação para minério de ferro.** Ouro Preto: L&E Graphar, 2014.
48. ROSA, A. C; OLIVEIRA, P. S.; DONDA, J. D. **Comparing ball and vertical mills performance: an industrial case study.** In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 2014. Anais: Santiago, 2014.
49. BOND, F. C. **Testing and Calculations.** In: WEISS, N. L. SME Mineral Processing Handbook, 1985.
50. STAMBOLIADIS, E.; PANTELAKI, O.; PETRAKIS, E. **Surface area production during grinding.** Minerals Engineering, 2009.
51. GUPTA, A.; YAN, D. S. **Mineral Processing Design and Operation: an introduction.** Elsevier, 2006.
52. ROWLAND, C. A.; KJOS, D. M. **Rod and Ball Mills.** In: MULAR, A. L.; BHAPPU, R. B. Mineral Processing Plant Design. New York: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1982. p. 239-278.
53. AZZARONI, E. **Cálculo de la Tasa de Molienda en Molinos de Bola.** In: IV SIMPOSIUM SOBRE MOLIENDA, Viña del Mar, 1984.
54. MANTELLATO, S.; PALACIOS, M.; FLATT, R. **Reliable specific surface area measurements on anhydrous cements.** Cement and Concrete Research, 2015.

55. KAYE, B. H. **Permeability techniques for characterizing fine powders.** Powder Technology, 1966.
56. SCHULZ, N. F. **Measurement of surface areas by permeametry.** International Journal of Mineral Processing, 1974.
57. MOURÃO, J. M.; STEGMILLER, L. **Influência da estrutura dos minérios de ferro na sua moabilidade.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 1990.
58. CHAGAS, T. T. R. **A moabilidade na moagem secundária de *pellet feeds* de minério de ferro em função da mineralogia, química e microestrutura.** 2008. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
59. RIBEIRO, M. R. **Investigação das características dos minérios de ferro da CVRD que influenciam em seu comportamento na moagem.** 2004. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
60. GRAÇA, L. M.; LAGOEIRO, L.E.; LIMA, R.M.F.; BARBOSA, P.F.; MACHADO, M.M. **Effect of the morphological types in grinding of iron-ore products.** Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review, n.36, 2015.
61. AUSTIN, L. G. **A mill power equation for SAG mill.** Minerals and Metallurgical Processing, 1990.
62. PITARD, F. F. **Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling, correctness and statistical process control.** CRC Press, 1993.
63. NAPIER-MUNN, T. J et al. **Mineral comminution circuits: their operation and optimization.** JKMRRC, 2005.
64. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3082: minérios de ferro – procedimentos de amostragem e preparação de amostras.** 2017.
65. BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** Campinas: Editora da Unicamp, 2001.
66. BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. **Statistics for experimenters.** John Wiley & Sons, 2005.
67. ANTONY, J. **Design of Experiments for engineers and scientists.** Elsevier, 2003.
68. Rowland, C. A. **Diameter factors affecting ball mill scale-up.** International Journal of Mineral Processing, v. 22, 1988.