

**Avaliação de Parâmetros Operacionais durante o Arranque
do Moinho AG/SAG de Neves-Corvo**

Hugo Miguel Cohen de Carvalho

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Geológica e de Minas

Orientador

Professor Doutor Fernando de Oliveira Durão

Júri

Presidente: Professora Doutora Maria Matilde Mourão de Oliveira Carvalho Horta
Costa e Silva

Orientador: Professor Doutor Fernando de Oliveira Durão

Vogal: Professor Doutor António Manuel Álvares Serrão Maurício

Novembro de 2021

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

*Esta Dissertação é dedicada à minha Mãe, ao meu Pai, às minhas Irmãs e ao meu Padrasto.
Mana e Pai, sem a vossa ajuda aí de cima não teria sido possível.*

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família, com especial foco à minha mãe por sempre ter ido mais além de modo, a me proporcionar todas as condições para ter chegado onde cheguei. Espero algum dia conseguir retribuir tudo o que me foi dado.

Em segundo lugar quero agradecer aos meus amigos, principalmente ao Diogo e à Margarida, por serem aquelas pessoas especiais na minha vida, que sem dúvida não seria a mesma sem a vossa presença. O meu muito obrigado à minha amiga Margarida Amorim por ser um exemplo de força e superação e por toda a ajuda dada ao longo da nossa amizade. O meu muito obrigado por toda a vossa motivação e apoio.

Seguidamente gostaria de agradecer ao meu chefe e amigo, engenheiro Adrian Bucur. Os seus ensinamentos e apoio ao longo destes quatro anos de convivência têm sido muito mais do que se poderia esperar de qualquer chefe.

Não quero deixar de referir os meus colegas e amigos de trabalho, por todos os bons momentos e camaradagem que me proporcionaram ao longo destes anos. O meu especial obrigado à minha colega e amiga, a engenheira Paula Lacerda.

Quero deixar o meu muito obrigado ao meu Orientador, o Professor Fernando Durão, por todos os ensinamentos, não só durante o meu percurso no Instituto Superior Técnico, mas também ao longo da realização deste trabalho.

Por fim gostaria de deixar o meu agradecimento à empresa onde trabalho, a SOMINCOR. Estes quatro anos de colaboração têm sido pautados principalmente por bons momentos, que seguramente levarei comigo para toda a vida.

Resumo

Sendo a Indústria Mineira um dos principais setores responsáveis pelo desenvolvimento das sociedades desde o início dos tempos e até aos dias de hoje, a necessidade de ter disponíveis recursos para uma população mundial, constantemente em crescimento, é cada vez mais importante.

De modo a suprir as constantes necessidades de metais essenciais para a sociedade, é necessário que as minas sejam cada vez mais eficientes e tenham maior capacidade de produção. Essa eficiência e maior capacidade de produção passa pela instalação de equipamentos maiores e que diminuam os tempos de paragem. Um dos equipamentos utilizado nas maiores minas do mundo e que permitiu aumentos de produção significativos e menores tempos de paragem devido a outros equipamentos, são os moinhos AG/SAG.

O presente documento visa analisar os dados obtidos durante o comissionamento e arranque do moinho AG/SAG de Neves-Corvo e verificar correlações entre parâmetros operacionais de modo a otimizar o seu funcionamento.

Com a realização desta Dissertação, foi possível verificar que o melhor modo de verificar correlações entre parâmetros operacionais é a utilização de regressões múltiplas, devido à complexidade de funcionamento de um equipamento como um moinho AG/SAG.

Por fim, concluiu-se que o bom conhecimento dos parâmetros operacionais de um moinho AG/SAG é de extrema importância para a otimização de um circuito.

Importa também referir a importância da continuação deste estudo para campanhas futuras de funcionamento do moinho.

Palavras-Chave: Moinho AG/SAG; Otimização; Correlação; SOMINCOR; Zinco

Abstract

Being the Mining Industry one of the main industry sectors responsible for the development of societies since the beginning of time to the present day, the need to have available resources for a constantly growing world population is increasingly important.

In order to meet the constant needs of essential metals for society, it is increasingly necessary to have more efficient mines with greater production capacity. This efficiency and greater production capacity involves the installation of larger equipment and also the reduction of downtime. One of the equipment's used in the largest mines in the world and which allowed significant increases in production and shorter downtimes due to other equipment, are the AG/SAG mills.

This document aims to analyze the data obtained during the commissioning and start-up of the AG/SAG mill in Neves-Corvo and to verify correlations between operational parameters in order to optimize its operation.

With the completion of this Dissertation, it was possible to verify that the best way to verify correlations between operational parameters is the use of multiple regressions, due to the complexity of the operation of an equipment such as an AG/SAG mill.

Finally, it is concluded that a good knowledge of the operational parameters of an AG/SAG mill is extremely important for the optimization of a circuit.

It is also important to mention the importance of the continuation of this study for future operating campaigns of the mill.

Keywords: AG/SAG Mill; Optimization; Correlation; SOMINCOR; Zinc

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrónimos	xiv
1. Introdução	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Estrutura e Organização da Dissertação.....	1
2. Estado de Arte	3
2.1 Cominuição.....	3
2.1.1 Etapas da Cominuição.....	3
2.1.2 Circuitos de Cominuição Genéricos.....	5
2.1.3 Circuitos de Cominuição para Flutuação de Sulfuretos Polimetálicos.....	6
2.2 Moagem Convencional.....	7
2.2.1 Exemplos de circuitos de Cominuição de moagem convencional.....	9
2.3 Moagem Autógena.....	10
2.3.1 Mecanismos de Moagem Autógena.....	12
2.3.2 Parâmetros Operacionais.....	13
2.3.2.1 Distribuição Granulométrica da Alimentação.....	13
2.3.2.2 Taxa de Alimentação.....	13
2.3.2.3 Velocidade de Rotação do Moinho.....	14
2.3.2.4 Torque ou Binário do Moinho.....	14
2.3.2.5 Carga do Moinho.....	15
2.3.2.6 Adição de Água.....	16
2.3.2.7 Carga Circulante.....	16
2.3.2.8 Consumo Específico de Energia (kWh/t).....	17
2.3.3 Controlo Operacional.....	17
2.3.4 Otimização.....	17
2.3.5 Circuitos de moagem com moinhos AG/SAG.....	18
2.3.6 Vantagens da Moagem Autógena.....	20
3. Caso de Estudo	21
3.1 Apresentação da Empresa.....	21
3.2 Lavaria do Zinco.....	21
3.2.1 Configuração Atual.....	21
3.2.2 Britagem e Moagem – Configuração Atual.....	24
3.3 Projeto de Expansão do Zinco (PEZ).....	24

3.3.1	Lavaria do Zinco – Configuração PEZ.....	26
3.3.1.1	Moagem – Configuração PEZ	29
3.3.1.2	Caracterização Minério.....	31
3.3.2	Moinho AG/SAG	32
3.3.2.1	Dimensões.....	32
3.3.2.2	Motor.....	34
3.3.2.3	Fornas.....	34
3.3.2.4	Crivo Giratório (<i>Trommel</i>).....	39
3.3.2.5	Filosofia de Controlo do Moinho AG.....	40
3.3.3	Hidrociclones	41
3.3.4	Vertimill	44
3.3.5	Balço de Massa Lavaria do Zinco – Fase 1B PEZ.....	45
4.	Metodologia	47
4.1	Recolha de Dados Automática – Instrumentação	47
4.1.1	Caudalímetros (electromagnéticos).....	48
4.1.2	Densímetros.....	48
4.1.3	Balanças	49
4.1.4	Analizador Granulométrico de Partículas	50
4.1.5	Transmissores de Pressão dos Descansos	50
4.1.6	Sistema PI.....	51
4.2	Recolha de Dados Manual	52
4.2.1	Amostragem.....	52
4.2.2	Tratamento das Amostras em Laboratório	52
5.	Resultados e Discussão	54
5.1	Apresentação dados recolhidos	55
5.1.1	Dados obtidos através de instrumentação	55
5.1.2	Dados obtidos através de amostragem.....	55
5.1.2.1	Amostragem da Alimentação do Moinho AG/SAG.....	55
5.1.2.2	Amostragem do <i>Overflow</i> dos Ciclones Primários	57
5.2	Análise dos dados obtidos.....	57
5.2.1	Matriz de Correlações Lineares das Variáveis Estudadas.....	58
5.2.2	Análise de Séries Temporais (Análise de Tendências).....	59
5.2.2.1	D80 da Alimentação e OF dos Ciclones Primários	59
5.2.2.2	Alimentação Fresca do Moinho AG/SAG	60
5.2.2.3	Velocidade de Rotação do Moinho AG/SAG.....	61
5.2.2.4	Caudal de Água da Caleira de Alimentação do Moinho AG/SAG.....	61
5.2.2.5	Caudal de Água de Diluição do UF dos Ciclones Primários	62
5.2.2.6	Caudal de Água Diluição Tanque de Descarga Moinho AG/SAG.....	64
5.2.3	Análise de Regressões entre Dois Parâmetros.....	64
5.2.3.1	Torque vs. Carga Interna do Moinho AG/SAG	65

5.2.3.2	Potência vs. Carga Interna do Moinho AG/SAG	66
5.2.3.3	D80 do <i>Overflow</i> dos Ciclones Primários vs. Consumo Específico de Energia.....	67
5.2.4	Análise de Regressões Lineares entre Múltiplos Parâmetros	69
5.2.4.1	Regressão Linear Múltipla Torque vs. Carga Interna, Recirculação de Pebbles, Caudal de Água da Caleira de Alimentação e Água de Diluição do UF dos Ciclones Primários	69
5.2.4.2	Regressão Linear Múltipla D80 do OF dos Ciclones Primários vs. Velocidade de Rotação do Moinho, Caudal de Água da Caleira de Alimentação do Moinho, Água de Diluição do Tanque de Descarga do Moinho, Água de Diluição do UF dos Ciclones Primários, Alimentação Fresca Moinho	70
5.2.4.3	Regressão Múltipla Carga Interna vs. Velocidade de Rotação do Moinho, Caudal de Água da Caleira de Alimentação do Moinho, Recirculação de <i>Pebbles</i> , Água de Diluição do UF dos Ciclones Primários	72
6.	Conclusão	74
6.1	Conclusões	74
6.2	Propostas de Desenvolvimentos Futuros.....	75
	Bibliografia	76
	Anexos	A
	Anexo I: Dados de funcionamento do moinho AG/SAG ao longo do seu período de funcionamento A (20 de Janeiro de 2021 16:00 a 26 de Janeiro de 2021 3:00).....	A
	Anexo II: Dados da Amostragem do <i>Overflow</i> dos Ciclones Primários.....	H
	(20 de Janeiro de 2021 16:00 a 26 de Janeiro de 2021 3:00).....	H

Lista de Figuras

Figura 1: Estágios de fragmentação. Fonte: Adaptado de (Chaves, 2012)	5
Figura 2: Circuitos de Cominuição: A) Circuito Aberto; B) Circuito aberto com classificação aos pés; C) Circuito fechado com classificação à cabeça; D) Circuito fechado com classificação aos pés. Fonte: Arquivo Pessoal.....	6
Figura 3: Aplicabilidade dos equipamentos de cominuição consoante a dureza e granulometria do minério. Fonte: (Beraldo, 1987).....	7
Figura 4: Mecanismos de moagem de moinhos rotativos. Fonte (Lynch, 2015)	8
Figura 5: Mecanismo de moagem de um moinho de barras. Fonte: (Leite, 1987)	9
Figura 6: Mecanismo de moagem de um moinho AG. Fonte:(Markstrom, 2020).....	12
Figura 7: Variação da velocidade do moinho com a variação do torque e a variação do centro de gravidade da carga com a variação da velocidade. Fonte:(Viklund, 2006)	15
Figura 8: Influência da variação dos vários parâmetros da moagem num moinho AG/SAG. Fonte:(Viklund, 2006)	16
Figura 9: Gamas de potências e granulometrias aplicadas a cada tipo de equipamento de cominuição. Fonte: Adaptado de (Markstrom, 2020).....	19
Figura 10: Fluxograma Lavaria do Zn - Configuração atual. Fonte: (Somincor, 2018).....	23
Figura 11: Novo sistema de tapetes transportadores instalado pelo PEZ. Fonte: (Somincor, 2017) ...	25
Figura 12: Novas células de flutuação instaladas na atual lavaria do zn.....	26
Figura 13: Fluxograma Lavaria do Zn - fase 1B PEZ.....	28
Figura 14: Torva de Alimentação do moinho AG/SAG com alimentador de Lagartas.....	29
Figura 15: Alimentador de Lagartas. Fonte: (Somincor, 2019)	29
Figura 16: Circuito de Transporte de minério para alimentação ao moinho AG/SAG	30
Figura 17: Etapas de britagem e moagem atuais comparativamente à configuração do PEZ.....	31
Figura 18: Desenho Esquemático Moinho AG/SAG. Fonte: (Somincor, 2011)	33
Figura 19: Moinho AG/SAG Instalado em Neves-Corvo	33
Figura 20: Motor de Acionamento Principal do Moinho AG/SAG	34
Figura 21: Esquema Ilustrativo dos locais de Instalação de um jogo de forras num Moinho AG/SAG. Fonte: Adaptado de (Ball Mill Diagram SAG Mill Semiautogenous Grinding Mill)	36
Figura 22: Identificação de um componente de um jogo de forras de um moinho AG/SAG	36
Figura 23: Siglas de Identificação da Alimentação ou Descarga	37
Figura 24: Jogo de Forras Completo Instalado no Interior do Moinho	37
Figura 25: a) Grelha de Descarga vista inferior, b) Grelha de Descarga vista superior	38
Figura 26: Grelhas de Descarga Instaladas no Interior do Moinho.....	38
Figura 27: Crivo Giratório da Descarga do Moinho.....	39
Figura 28: Ciclone Primário Desmontado	42
Figura 29: Bateria de Ciclones Primários.....	43
Figura 30: Vertimill Instalado em Neves-Corvo.....	44
Figura 31: Fluxograma Lavaria do Zn Fase 1B com balanço de massas. Fonte: (Somincor, 2019)....	46
Figura 32: Diagrama de Blocos do Circuito de Moagem com pontos de medição de parâmetros realizados por instrumentação	47
Figura 33: Conjunto Caudalímetro e Transmissor. Fonte: (Foxboro, 2010)	48
Figura 34: a) Portador de Fonte Radioativa, b) Detetor de Cintilação, c) Microprocessador	49
Figura 35: Estrutura de Carga da Balança. Fonte: (Thermo Fisher Scientific, 2013)	49
Figura 36: Imagem do Ecrã de Operação do Analisador de Partículas. Fonte: (Woodgrove Technologies Inc., 2017)	50
Figura 37: Processo de Recolha e Disponibilização de Dados Através do Sistema PI. Fonte: (Osisoft, 2020).....	51
Figura 38: Cortador e Balde para Amostragem	52
Figura 39: Granulómetro Laser	53
Figura 40: Esquema dos Fluxos de Entrada e de Saída do Moinho AG/SAG.....	55
Figura 41: Curva de distribuição granulométrica da amostra da alimentação do moinho AG/SAG	57
Figura 42: Matriz de Correlações lineares das Variáveis Analisadas (Bloco Triangular Inferior)	58

Figura 43: Série Temporal D80 do OF dos Ciclones Primários	59
Figura 44: Série Temporal Alimentação Fresca Moinho AG/SAG	60
Figura 45: Histograma Alimentação Fresca Moinho AG/SAG	60
Figura 46: Série Temporal Velocidade de Rotação Moinho AG/SAG	61
Figura 47: Histograma Velocidade de Rotação Moinho AG/SAG	61
Figura 48: Série Temporal Caudal de Água Caleira de Alimentação Moinho AG/SAG.....	62
Figura 49: Histograma do Caudal de Água da Caleira de Alimentação do Moinho AG/SAG	62
Figura 50: Série Temporal Água Diluição UF Ciclones.....	63
Figura 51: Histograma Água Diluição Underflow Ciclones.....	63
Figura 52: Série Temporal Água Diluição Tanque Descarga Moinho AG/SAG	64
Figura 53: Histograma Água de Diluição Tanque Descarga Moinho AG/SAG	64
Figura 54: Regressão Linear Simples Torque vs. Carga Interna	65
Figura 55: Significância Estatística da Relação entre o Torque e a Carga do Moinho.....	65
Figura 56: % de Variação Explicada pelo Modelo de Regressão	66
Figura 57: Correlação Entre o torque e a carga do moinho	66
Figura 58: Curva de Regressão entre Potência e Carga Interna do Moinho AG/SAG	67
Figura 59: Significância Estatística da Relação entre a Potência e a Carga Interna do Moinho AG/SAG	67
Figura 60: % de Variação Explicada pelo Modelo de Regressão	67
Figura 61: Curva de Regressão entre D80 do OF dos Ciclones Primários e Consumo Específico de Energia	68
Figura 62: Significância Estatística da Relação entre o D80 do OF dos Ciclones Primários e Consumo Específico de Energia.....	68
Figura 63: % de Variação Explicada Pelo Modelo de Regressão.....	68
Figura 64: Correlação Entre o D80 do OF dos Ciclones Primários e o Consumo Específico de Energia	69
Figura 65: Significância Estatística da Relação entre o Torque e as outras variáveis	69
Figura 66: % de Variação Explicada pelo Modelo de Regressão	69
Figura 67: Influência das Mudanças de Variáveis no Torque do Moinho	70
Figura 68: Impacto incremental das Diversas Variáveis	70
Figura 69: Significância Estatística da Relação entre o D80 do <i>Overflow</i> dos Ciclones Primários e as outras Variáveis	71
Figura 70: % de Variação Explicada pelo Modelo de Regressão	71
Figura 71: Influência das Mudanças de Variáveis no D80 do OF dos Ciclones Primários.....	71
Figura 72: Impacto Incremental das Diversas Variáveis	72
Figura 73: Relação Estatística entre a Carga Interna do Moinho e as Restantes Variáveis	72
Figura 74: % de Variação Explicada Pelo Modelo De Regressão	73
Figura 75: Influência das Mudanças de Variáveis na Carga Interna do Moinho	73
Figura 76: Impacto Incremental das Diversas Variáveis	73

Lista de Tabelas

Tabela 1: Tipos de fragmentação e suas características. Adaptado (Leite, 1987)	4
Tabela 2: Principais circuitos de moagem. Fonte: Adaptado de (Beraldo, 1987)	19
Tabela 3: Comparação entre os F80, P80 e Consumos Especificos de Energia entre a configuração atual da Lavaria do Zn e a Configuração do PEZ	31
Tabela 4: Sumário dos Testes de Cominuição realizados Através de "SAGDesign". Fonte: Adaptado de (Orway mineral Consultants, 2020)	32
Tabela 5: Sumário dos valores médios obtidos para o total de amostragem. Fonte: Adaptado de (Orway Mineral Consultants, 2020)	32
Tabela 6: Composição do jogo de Forras do Moinho AG/SAG de Neves-Corvo	35
Tabela 7: Características do Crivo Giratório	39
Tabela 8: Características técnicas dos Ciclones Primários e Secundários	43
Tabela 9: Distribuição mássica (húmido e seco) dos vários calibres da amostra de alimentação do moinho AG/SAG	56
Tabela 10: Distribuição Mássica por Calibres da amostra da alimentação do moinho AG/SAG.....	56
Tabela 11: Dados de Funcionamento Moinho AG/SAG.....	A
Tabela 12: Dados da Amostragem do OF dos Ciclones Primários.....	H

Lista de Acrónimos

PEZ – Projeto de Expansão do Zinco

SOMINCOR – Sociedade Mineira de Neves-Corvo

AG – *Autogenous Grinding* (Moagem Autógena)

SAG - *Semi-Autogenous Grinding* (Moagem Semi-Autógena)

ROM – *Run-of-Mine* (Minério Tal-qual)

OF – *Overflow* (Transbordo)

UF – *Underflow* (Espessado)

RZ – Rejeitos do Zinco

MTPA – Milhões de Toneladas por Ano

FE – *Feed End*

DE – *Discharge End*

BWI – *Bond's Ball Mill Work Index*

RWI – *Bond's Rod Mill Work Index*

F80 – 80% passing size of feed (Módulo de calibre a 80% da alimentação, lado de malha quadrada de crivo pela qual passa 80% da alimentação)

P80 – 80% passing size of product (Módulo de calibre a 80% do produto, lado de malha quadrada de crivo pela qual passa 80% do produto)

d100 – 100% passing size of product (calibre máximo)

D – Diâmetro do moinho

L – Comprimento do moinho

EGL – *Effective Grinding Length* (Comprimento Efetivo de Moagem)

W_{SDT} – Consumo Específico de Energia da moagem SAG de um $F_{80} = 152,4$ mm para um $T_{80} = 1,700$ μm

1. Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Sendo a Indústria Mineira um dos principais setores responsáveis pelo desenvolvimento das sociedades desde o início dos tempos e até aos dias de hoje, a necessidade de ter disponíveis recursos para uma população mundial, constantemente em crescimento, é cada vez mais importante.

De modo a suprir as constantes necessidades de metais essenciais para a sociedade, é necessário que as minas sejam cada vez mais eficientes e tenham maior capacidade de produção. Essa eficiência e maior capacidade de produção passa pela instalação de equipamentos maiores e que diminuam os tempos de paragem. Um dos equipamentos utilizado nas maiores minas do mundo e que permitiu aumentos de produção significativos e menores tempos de paragem devido a outros equipamentos, são os moinhos AG/SAG. O tamanho destes equipamentos, permite aumentar a produção de maneira que outros moinhos não permitiriam. O facto deste tipo de equipamento permitir a eliminação de outros equipamentos a montante, como por exemplo circuitos de britagem e outros moinhos, reduz consideravelmente os custos operacionais e tempos de paragem para manutenção dos outros equipamentos. A versatilidade dos moinhos AG/SAG, permitindo o seu funcionamento tanto como moagem Autógena como moagem Semi-Autógena, são outros dos fatores que fazem este um dos equipamentos mais utilizados na indústria mineira em todo o mundo.

Fazendo a SOMINCOR parte de um dos grandes grupos mineiros mundiais, a Lundin Mining, como estratégia para aumentar a sua produção de zinco, foi decidido instalar um moinho AG/SAG e proceder à expansão das instalações mineiras e da existente Lavaria do Zinco. Essa expansão consiste na instalação de novas telas transportadores com um comprimento total de cerca de 3 km e uma nova britagem à superfície, além do novo moinho e a instalação de novas células de flutuação.

Sendo o novo moinho AG/SAG, o coração da Lavaria do Zinco de Neves-Corvo, pretendeu-se com este trabalho anal procurar relações entre parâmetros/variáveis operacionais de modo a melhor entender o seu funcionamento e futuramente otimizar os seus parâmetros operacionais, auxiliando na obtenção de melhores resultados.

1.2 Estrutura e Organização da Dissertação

A presente Dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

No *Capítulo 1*, faz-se uma introdução ao tema, abordando-se as motivações e os objetivos pretendidos com a elaboração deste documento.

No *Capítulo 2*, Estado de Arte, aborda-se a temática dos circuitos de cominuição e mais concretamente os circuitos de moagem.

É feita a caracterização dos circuitos convencionais de moagem e posteriormente uma caracterização dos circuitos que recorrem a moagem Autógena e Semi-Autógena.

No *Capítulo 3*, é feita uma apresentação do Caso de Estudo, começando por fazer uma apresentação da Empresa, uma apresentação do Projeto de Expansão do Zinco e mais especificamente o que este contempla.

No *Capítulo 4*, é feita uma descrição das metodologias utilizadas para a obtenção dos dados que serão posteriormente analisados e comentados no capítulo seguinte.

No *Capítulo 5*, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos através da análise de series temporais e modelos de regressão entre duas e mais variáveis operacionais.

Finalmente no *Capítulo 6*, são apresentadas as conclusões da realização desta Dissertação e são ainda sugeridos trabalhos futuros.

2. Estado de Arte

2.1 Cominuição

A cominuição define-se como a redução do tamanho de materiais sólidos em partículas de dimensões inferiores, através da alteração da sua dimensão e forma para além de determinados limites como resposta a um estado de tensão (aplicação de forças de tração, compressão, torção, corte, flexão ou atrito para além do valor da tensão de rutura), dando-se a criação de novas superfícies livres ao longo de zonas de fragilidade. (Beraldo, 1987)

No caso da mineralurgia, corresponde à obtenção de uma composição granulométrica até à libertação de uma espécie mineral e rejeição do estéril de forma a aumentar a eficiência da concentração. Das operações principais, a cominuição é a que acarreta maiores custos, razão pela qual é preponderante quantificar a energia despendida e otimizá-la, isto é, aproveitar a energia disponível através da utilização máxima dos equipamentos em diagramas bem articulados de forma a obter os calibres desejados. (Leite, 1987)

2.1.1 Etapas da Cominuição

O primeiro estágio de cominuição decorre ainda sob o domínio da exploração, durante o desmonte, onde ocorre a libertação mineral e separação do minério do estéril devido às suas diferentes propriedades mecânicas. Surge, então, a necessidade de coordenar esta fase com o processamento mineral de forma a obter resultados mais eficientes e diminuir gastos energéticos nos estágios seguintes, nomeadamente na fragmentação. (Lynch, 2015)

A forma de obter um desmonte ajustado às necessidades do minério e à sua fragmentação e moagem será através da gestão da energia do desmonte conseguida pela manipulação da carga e tipo de explosivo, malha de perfuração, tamponamento, temporização, etc, que terá como benefícios a diminuição do consumo de energia específico dos estágios seguintes e a obtenção de um minério ROM (*run-of-mine*) com granulometria controlada favorecendo a produção de material mais fino resultando em melhorias na alimentação dos equipamentos e na recuperação do concentrado. (Lynch, 2015)

O ciclo produtivo de uma mina deve ser encarado com um conjunto de processos interligados cuja otimização como um todo tem a denominação de *Mine to Mill*, conceito atual que tem como objetivo integrar o produto do desmonte nas etapas subsequentes, melhorando a cadeia produtiva através de melhores resultados conjuntos. (Neves, 2018)

A cominuição é realizada em três fases, britagem, granulação e a moagem cujos produtos pertencem a classes granulométricas específicas condicionadas pelo tipo de exploração, aplicações e mecanismos de fragmentação.

Conseqüentemente, a cominuição pode ser dividida em dois grandes grupos cujas diferenças são enumeradas na Tabela 1.

TABELA 1: TIPOS DE FRAGMENTAÇÃO E SUAS CARACTERÍSTICAS. ADAPTADO (LEITE, 1987)

Fragmentação Graúda	Fragmentação Fina
Tempo de residência independente do caudal de alimentação	Tempo de residência varia fortemente com o caudal de alimentação ($T_r = \text{volume útil} / \text{caudal volúmico}$) e é um parâmetro operacional
Geometria e dimensões da máquina relativamente ao calibre da alimentação, condicionam a cominuição produzida	Grau de fragmentação independente da geometria e dimensões da máquina
Cominuição partícula a partícula sem interação entre elas, sob a ação de poucas peças fragmentadoras, em geral duas, de grandes dimensões, animadas de movimentos geométricos bem definidos	Cominuição coletiva, com interações entre partículas, grande número de agentes fragmentadores de pequenas dimensões, colocados num tambor cilíndrico animado de movimento de rotação ou vibração
Caudal de passagem condicionado pela geometria e movimento relativo das peças fragmentadoras que influenciam o mecanismo de transporte interior e varia com a regulação (afastamento máximo ou mínimo entre as peças fragmentadoras na descarga)	Caudal de passagem varia diretamente com o caudal de alimentação porque a descarga dá-se por transbordo
Classe granulométrica: 1000 a 20 mm	Classe granulométrica: 20 a 0,2 mm
Relações de redução entre 5:1 e 12:1	Relações de redução entre 30:1 e 500:1

A nível industrial, a cominuição resulta na sucessão dos dois tipos de fragmentação descritos nos quais a relação de redução requerida, tendo em conta que o calibre de entrada e de saída rondam os 400 mm e os 0,3 mm, respetivamente, é obtida à custa do encadeamento em série de equipamentos de cominuição, ou eventualmente vários conjuntos em série a operar em paralelo, em que cada um dá o seu contributo com uma relação de redução limitada para a relação de redução total. (Leite, 1987)

A Figura 1 esquematiza as várias etapas de fragmentação e os calibres médios de alimentação e dos produtos resultantes dessas etapas assim como a relação de redução média.



FIGURA 1: ESTÁGIOS DE FRAGMENTAÇÃO. FONTE: ADAPTADO DE (CHAVES, 2012)

2.1.2 Circuitos de Cominuição Genéricos

Os circuitos são articulações de circuitos de classificação entre equipamentos fragmentadores que encaminham o material com granulometria adequada para o equipamento seguinte. A classificação pode ser estruturada de diferentes formas que se dividem em classificação à cabeça do circuito, na qual o material é classificado à boca do fragmentador evitando assim a sobrefragmentação de material com calibre inferior ao de corte e o encravamento por material de calibre superior ao admitido pelo equipamento, ou classificação a jusante do equipamento fragmentador. (Leite, 1987).

Os circuitos podem ainda ser classificados segundo a sua marcha em circuitos fechados, abertos e abertos com repisa. Num circuito fechado (circuitos C e D da Figura 2), com classificação a jusante ou à cabeça do equipamento fragmentador, ocorre a formação de um caudal de retorno constituído pela fração mais grosseira que é novamente encaminhada para o fragmentador onde se junta com a alimentação fresca.

Nos circuitos abertos, a alimentação (circuitos A e B da Figura 2) é um caudal unidirecional que é sujeito à ação de fragmentação apenas uma vez, sendo necessário manter uma regulação suficientemente fechada de forma a maximizar a produção de uma determinada granulometria tendo como consequência adversa a produção de material muito fino. De forma a contornar esta condicionante, poderá realizar-se marcha em circuito aberto com repisa na qual o material é submetido à ação de duas máquinas fragmentadoras em série: i) um fragmentador principal com uma regulação superior de forma a evitar a produção de finos; ii) um fragmentador secundário que, após classificação, efetua a redução da fração grosseira da saída do fragmentador principal.

Do ponto de vista energético, o circuito fechado é muito mais eficiente pois este tipo de marcha permite a utilização de regulações muito superiores evitando a subfraturação, uma vez que o tempo de residência por passagem é reduzido substancialmente e o material mais grosseiro tem a possibilidade de retornar ao equipamento de cominuição uma ou mais vezes. No entanto, as suas instalações são mais dispendiosas sendo que a escolha do tipo de circuito deve ter como base critérios técnico-económicos. (Beraldo, 1987)

A fração de material que retorna ao equipamento fragmentador para ser novamente submetido à sua ação e que constitui o supracrivo ou underflow do classificador, denomina-se carga circulante. Este caudal expressa-se como uma percentagem da alimentação fresca do circuito fechado e é recorrentemente muito superior à alimentação fresca afetando significativamente a eficiência do processo e a sua capacidade. (Lynch, 2015)

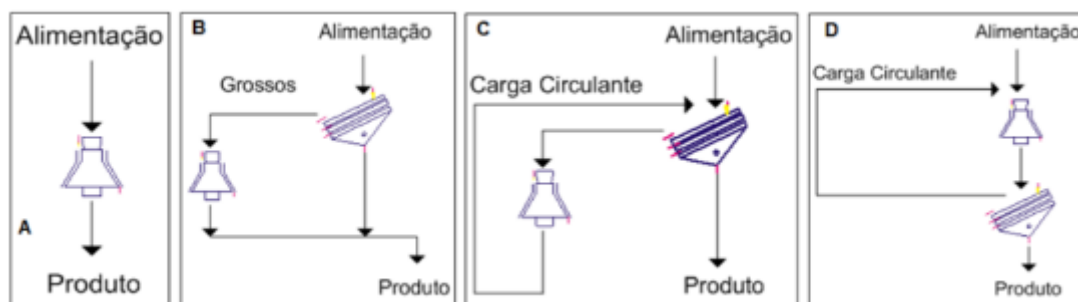


FIGURA 2: CIRCUITOS DE COMINUIÇÃO: A) CIRCUITO ABERTO; B) CIRCUITO ABERTO COM CLASSIFICAÇÃO AOS PÉS; C) CIRCUITO FECHADO COM CLASSIFICAÇÃO À CABEÇA; D) CIRCUITO FECHADO COM CLASSIFICAÇÃO AOS PÉS.
 FONTE: ARQUIVO PESSOAL

2.1.3 Circuitos de Cominuição para Flutuação de Sulfuretos Polimetálicos

O tratamento de minério de sulfuretos polimetálicos recorre, inevitavelmente, à flutuação cujo sucesso depende inequivocamente da redução das partículas a montante, para calibres que garantam a libertação mineral e permitam a sua flutuabilidade (calibres inferiores a 48 malhas e superiores a 5 micras porque partículas muito finas têm tendência a acompanhar os filetes líquidos que se formam à volta das bolhas e há menor probabilidade de choque entre as bolhas de ar e as partículas sólidas). Para tal, é recorrente o uso de circuitos de fragmentação com moinhos SAG ou moinhos de bolas. O calibre de libertação difere de mineral para mineral sendo necessário, de forma a recuperar vários metais e a evitar o dispêndio de energia na cominuição de minerais já libertos, a realização de remoagens entre estágios de flutuação diferencial onde o rejeitado dos primeiros estágios é remoído até calibre adequado à sua flutuação tal como acontece em minérios de cobre e zinco. (Lynch, 2015)

A escolha do equipamento de cominuição deve ser criteriosa tendo como base as características do minério em questão tais como dureza, granulometria e humidade. A Figura 3 representa a aplicabilidade de diversos equipamentos tendo em consideração estas características.

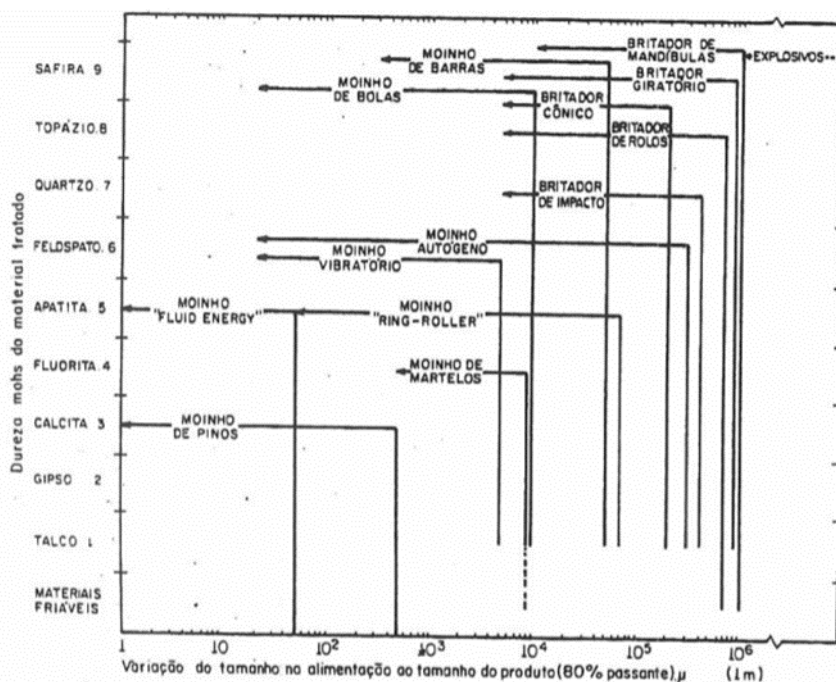


FIGURA 3: APLICABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS DE COMINUIÇÃO CONSOANTE A DUREZA E GRANULOMETRIA DO MINÉRIO. FONTE: (BERALDO, 1987)

2.2 Moagem Convencional

A moagem ou fragmentação fina constitui a última etapa de redução de calibre que opera sobre a classe granulométrica 20-0,2 mm reduzindo-a para calibres inferiores a 0,074 mm à custa de ações de impacto e abrasão desempenhadas a seco ou, mais comumente, via húmida. (Wills & Finch, 2015)

Este processo é normalmente realizado em moinhos de tambor cilíndrico com relações comprimento/diâmetro de 1,5 a 1, munidos de forras com levantadores e carga moente que pode ser de bolas (20 mm de diâmetro para moagem fina a 150 mm para moagem grossa), barras ou o próprio minério. Consoante o tipo de movimento imprimido pelo moinho à carga, os moinhos podem classificar-se em rotativos ou agitados. Nos moinhos rotativos o tambor é animado de um movimento de rotação e são normalmente empregues na moagem primária em que partículas entre 5 e 250 mm são reduzidas a calibres na ordem dos 25-300 μm. (Wills & Finch, 2015)

Nos moinhos agitados, o tambor horizontal ou vertical é estacionário e o movimento é transmitido à carga de minério e à carga moente (constituída por corpos de 25 mm ou menos) através de um agitador interno que normalmente compreende um eixo central ao qual são fixados parafusos, pinos ou discos de vários designs. Estes moinhos são principalmente utilizados em moagem fina (15–40 μm) e ultrafina (<15 μm). (Wills & Finch, 2015)

Os principais tipos de moinhos rotativos são os moinhos de bolas e os moinhos de barras cuja carga moente corresponde a 45 % do volume interno útil do tambor no tambor. O caudal de minério, que flui continuamente ao longo do moinho, deve ser o suficiente para ocupar os vazios da carga moente que, nos moinhos e bolas corresponde a 40 a 43 % do volume total ocupado pelas bolas e nos moinhos de

barras 20 a 22 % do volume total ocupado pelas barras, evitando assim fenômenos de saturação nos quais a carga sobrenadante não recebe energia na zona ativa. (Leite, 1987)

Neste tipo de moinhos o mecanismo de fragmentação é desenvolvido à custa da elevação dentro do tambor em rotação da carga moente até ao ângulo em que a força da gravidade anula as forças de atrito e centrífuga, e esta inicia uma trajetória descendente colidindo com o minério que sofre ações de impacto no pé da carga, fragmentando partículas de maior calibre, e de atrito e corte geradas no seio da carga pelo deslizamento interpartículas e partícula-carga moente favorecendo a redução de calibre de partículas mais finas. (Leite, 1987)

Estes tipos de ações têm a elas associadas diferentes trajetórias de partículas sendo elas a catarata, característica da moagem mais grosseira e de velocidades de moinho superiores e a cascata na qual ocorre a moagem fina a velocidade de rotação inferiores tal como se pode observar na Figura 4. (Lynch, 2015)

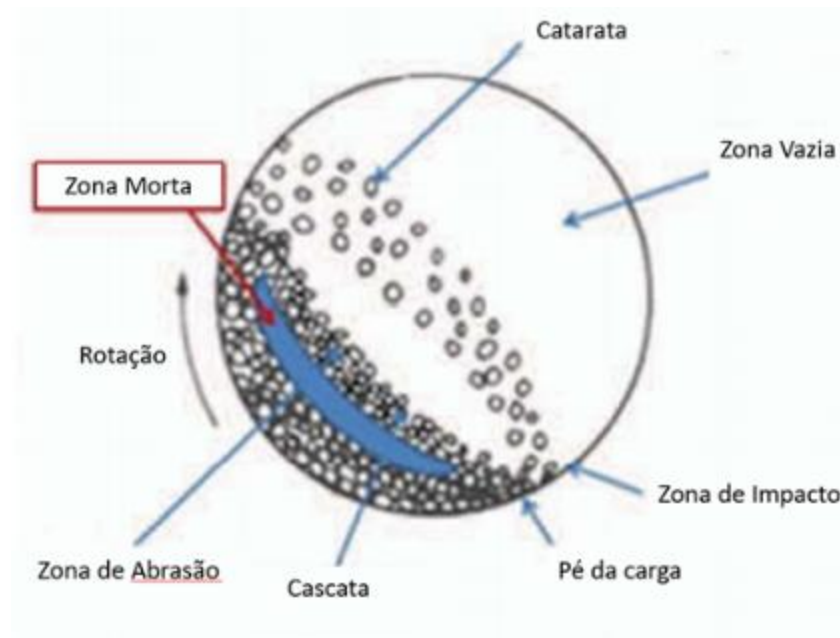


FIGURA 4: MECANISMOS DE MOAGEM DE MOINHOS ROTATIVOS. FONTE (LYNCH, 2015)

Os moinhos de barras possuem uma particularidade que permite obter um produto com uma composição granulométrica mais regular, mais bem classificada e com menos produção de finos. Isto deve-se ao efeito escudo caracterizado por uma classificação interna das partículas da polpa devido à presença de partículas de calibre superior no seio da carga que originam um arranjo espacial das barras de tal forma que se formam canais de seções variáveis que permitem o encaminhamento dos calibres finos até à descarga sofrendo novamente a ação esmagadora das barras numa zona mais adiantada tal como se pode observar na Figura 5. (Leite, 1987)

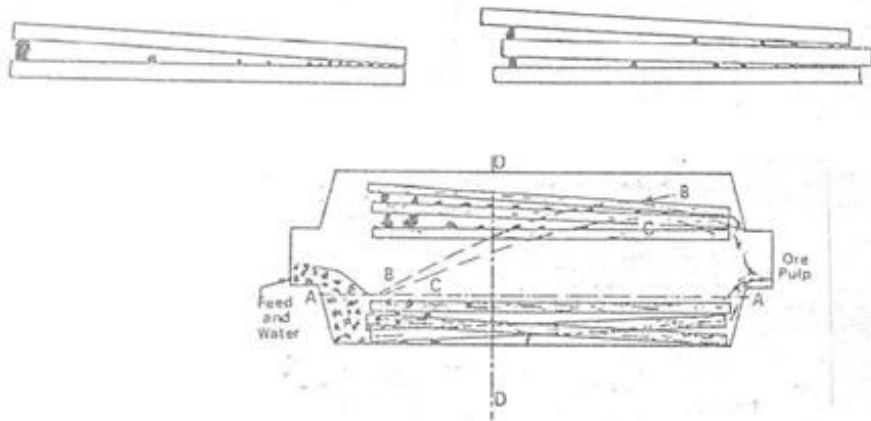


FIGURA 5: MECANISMO DE MOAGEM DE UM MOINHO DE BARRAS. FONTE: (LEITE, 1987)

A principais diferenças entre os moinhos de bolas e os moinhos de barras para além da diferença óbvia da configuração da carga moente são o facto de os moinhos de barras possuírem relações comprimento/diâmetro maiores para evitarem o atravessamento de barras e, devido ao facto de que as barras possuem uma massa superiores às bolas, estas são indicadas para a fragmentação de calibres superiores sendo recorrentemente aplicados no primeiro andar da moagem. (Leite, 1987)

O tipo de moinhos agitados mais utilizado são os moinhos verticais, mundialmente reconhecidos pela sua eficiência energética na aplicação em moagens secundárias e terciárias, baixos custos operacionais e menor necessidade de espaço, podendo ocupar 50% menos espaço do que um moinho de bolas. Estes equipamentos possuem uma ampla gama de calibres de alimentação (400 a 90 micra) e tonelagens superiores a 750 t/h. Mecanicamente, este é um equipamento simples com um parafuso agitador suspenso na câmara de moagem acionado por um motor de velocidade fixa através de uma caixa de engrenagem planetária. (Outotec, 2021)

Conforme as partículas são moídas, elas ascendem até ao topo do moinho e transbordam para um tanque de descarga. Uma mudança na direção de rotação da pasta quando ela faz a transição do moinho para o tanque de separação causa turbulência que facilita o assentamento do material mais grosseiro que é recirculado de volta para o fundo do moinho. A granulometria do produto final é fator de potência de moagem aplicada, taxa de fluxo de alimentação e densidade da polpa. (Outotec, 2021)

2.2.1 Exemplos de circuitos de Cominuição de moagem convencional

Nos circuitos de fragmentação tradicionais é usual a utilização de britadores de cones ou de maxilas para a fragmentação primária e moinhos de barras e de bolas para a fragmentação secundária e terciária em circuito fechado.

A extensa aplicação de moinhos de bolas deve-se à sua simplicidade, baixo custo operacional e a uma vasta gama de calibres de alimentação e de dimensões escolhidas em função da granulometria. (Beraldo, 1987) Estes moinhos são utilizados num único estágio de moagem primária (pouco comum), na moagem primária com alimentações superiores a 20 mm em circuitos com mais de um estágio, na

moagem secundária/terciária em circuitos cujo primeiro estágio é desempenhado por moinhos AG/SAG ou moinhos de barras, sendo esta a sua principal aplicação, ou na remoagem de produtos de circuito de concentração. (Napier-Munn, 1996)

Nas últimas décadas, os circuitos fechados AG/SAG difundiram-se retirando protagonismo aos circuitos com múltiplos estágios de fragmentação e moagem com recurso a moinhos de bolas passando estes a ser utilizados maioritariamente na moagem secundária. Os moinhos verticais também vieram substituir os moinhos de bolas em moagens mais finas (F80 de cerca de 50 µm).

Tal como o moinho de bolas, o moinho de barras teve uma grande dispersão no século 20 tendo sido substituído nos anos 70 pelos circuitos AG/SAG, isto porque os moinhos de barras apresentam limitações quanto às suas dimensões apesar de serem muito eficientes na fragmentação secundária produzindo produtos com P80 entre 25 mm e 1 - 2 mm sendo esta última gama de calibres a alimentação ideal de um moinho de bolas. (Napier-Munn, 1996) Consequentemente, são recorrentemente aplicados na moagem primária em circuitos abertos a alimentar moinhos de bolas. (Beraldo, 1987)

2.3 Moagem Autógena

Autógeno é o que se produz sem auxílio de agentes exteriores, ou seja, é algo que se auto produz. Este termo foi aplicado à moagem a partir dos anos 50 aquando da utilização do próprio minério como carga moente. (Napier-Munn, 1996) Esta tecnologia surgiu quando se aliou aos moinhos de *Pebbles*, cuja carga moente eram seixos rolados, o efeito de destruição dos calibres graúdos em moinhos equipados com levantadores que elevam a carga promovendo a sua queda. (Leite, 1987)

Esta tecnologia só poderá ser aplicada a instalações com grandes tonelagens uma vez que estes equipamentos necessitam de possuir grande diâmetro (diâmetro 1,5 a 3 vezes superior ao comprimento) para que, com o auxílio dos levantadores, a energia potencial da carga seja aumentada.

Nestes moinhos a relação de redução total é realizada num único estágio no qual se concentram todas as etapas de cominuição eliminando a necessidade de utilização de outros equipamentos de fragmentação e o consumo de aço utilizado nas tecnologias tradicionais (ou reduzida, no caso da moagem semi autógena que utiliza bolas numa percentagem de 5 a 7 % do volume interno do moinho). Estes fatores resultam numa diminuição dos custos operacionais na ordem dos 55 a 65 % e dos custos de manutenção. No entanto, os custos energéticos poderão ser mais avultados. (Napier-Munn, 1996)

Na maioria dos casos a alimentação dos moinhos AG/SAG é o produto da britagem, podendo ser também alimentados pelo produto proveniente diretamente da mina ou por britadores secundários. Nos circuitos mais comuns, os moinhos AG/SAG operam em circuito fechado com classificação a juzante, através de um *trommel* (crivo rotativo) ou de um crivo vibratório, utilizado em moagem por via húmida, onde o supracrivo (*pebbles* e/ou bolas) poderá retornar ao moinho continuamente através de tapetes ou descontinuamente sendo descarregado para uma caixa e armazenado em pilhas e carregado periodicamente no moinho conforme as condições operacionais. Uma alternativa utilizada em conjunto

com o *trommel* poderá ser a recirculação interna na qual o material é conduzido por uma espiral inversa ou jatos de água para o centro do *trommel* e novamente encaminhado para o moinho. A polpa (infracrivo) flui por entre as aberturas do *trommel* prosseguindo para a etapa seguinte do processamento que normalmente consiste numa etapa de hidroclassificação por ciclones. (Napier-Munn, 1996)

A eficiência desta técnica é maximizada quando é empregue a minérios com elevada dureza, densidade e textura fina, favorecendo a redução de calibres intermédios e finos pelos calibres graúdos enquanto estes se reduzem a si próprios simultaneamente. Portanto, sendo intervenientes na moagem uma vasta gama de calibres, estes moinhos serão alimentados por um *tout-venant* (tal-qual). No entanto, para que os mecanismos de moagem sejam efetivos é imperativo manter a proporção de calibres adequada. Esta limitação é contornada através da ensilagem de lotes de material graúdo, intermédio e fino que serão sujeitos a estágios de fragmentação prévia. Uma outra desvantagem desta tecnologia é a produção de um lote excedentário de calibre intermédio em circuitos fechados de circuitos primários de moagem autógena. Este fenómeno deve-se ao facto de estas partículas serem dificilmente destruídas pelas partículas graúdas e demasiado pequenas para serem *pebbles*. As soluções encontradas para o alcance do equilíbrio de formação/ destruição deste lote (gama de calibres entre os 35 e os 75 mm) é a moagem semi autógena, a ensilagem dos lotes e/ou o seu processamento à parte com classificação prévia da alimentação desviando o lote para um circuito de granulação tradicional. (Leite, 1987).

A moagem semi autógena será uma alternativa para minérios duros e terá diferentes efeitos consoante o tamanho e quantidade de carga moente. Regra geral, o aumento da carga moente favorecerá a fragmentação de calibres graúdos e intermédios que, perdendo a sua capacidade de moer os calibres mais finos, diminuirão a sua fração granulométrica. A escolha do tamanho das bolas será influenciada pelo tipo de minério sendo mais apropriado a aplicação de bolas maiores em minérios mais duros e de calibre maior. Contrariamente, um aumento da carga moente com dimensões inferiores favorecerá a moagem de calibres intermédios e finos devido à maior frequência de impactos e maior área superficial. (Lynch, 2015)

Os moinhos SAG produzem produtos com granulometrias superiores aos moinhos AG onde é beneficiado o mecanismo de abrasão. A escolha por um destes equipamentos baseia-se no tipo de minério, principalmente a sua competência (medida da resistência à fracturação das partículas com calibre compreendido entre 15-75 mm), sendo aconselhada a operação com moinhos AG para minérios competentes, caso contrário aplicar-se-á um moinho SAG apesar do aumento do consumo de aço e maior desgaste das forras. Nos circuitos, ambos os equipamentos são recorrentemente seguidos de moinhos de bolas que são responsáveis pela redução de calibre até que este seja admissível na flutuação. (Lynch, 2015)

As forras, de diferentes materiais e configurações, revestem o tambor do moinho evitando a sua danificação e desempenham um papel crucial no processo devido ao levantamento da carga, de modo a produzir um efeito de cascata adequado e a projeção da carga moente para o pé da carga de minério, à classificação do material permitindo que pedaços de rocha pequenos o suficiente saiam através das grelhas de descarga e a evacuação ou “bombagem” da polpa do moinho, especialmente importante em

moinhos em circuito fechado com ciclones e a operar com uma elevada carga circulante, de modo a que não se forme uma “piscina” de polpa e reduzir a eficiência dos impactos da carga e bolas. (Napier-Munn, 1996)

2.3.1 Mecanismos de Moagem Autógena

Dada a configuração do tambor e a vasta gama de granulometrias que alimenta o moinho, o movimento do tambor ocasiona a segregação de calibres na qual os finos percolam por entre os grãos posicionando-se no fundo do tambor, o que resulta em diferentes trajetórias realizadas por estas partículas. (Leite, 1987)

Os movimentos realizados pelas partículas traduzem-se em diferentes mecanismos de fragmentação sendo eles o choque, provocado pela elevação da carga através dos levantadores e queda na vertical para a zona do pé da carga descrevendo uma catarata que, favorece a fragmentação de grãos (75 a 135 mm), o atrito e a compressão, originados no seio da carga e no contacto com o tambor, onde predomina a produção de calibres finos. Nesta região a carga não se comporta como um corpo sólido, mas sim como um conjunto de camadas que deslizam umas sobre as outras (Figura 6). (Napier-Munn, 1996) Portanto, as partículas migram nas suas sucessivas trajetórias até atingirem a catarata que as impulsiona para a frente da descarga facilitando a sua saída do tambor. (Leite, 1987)

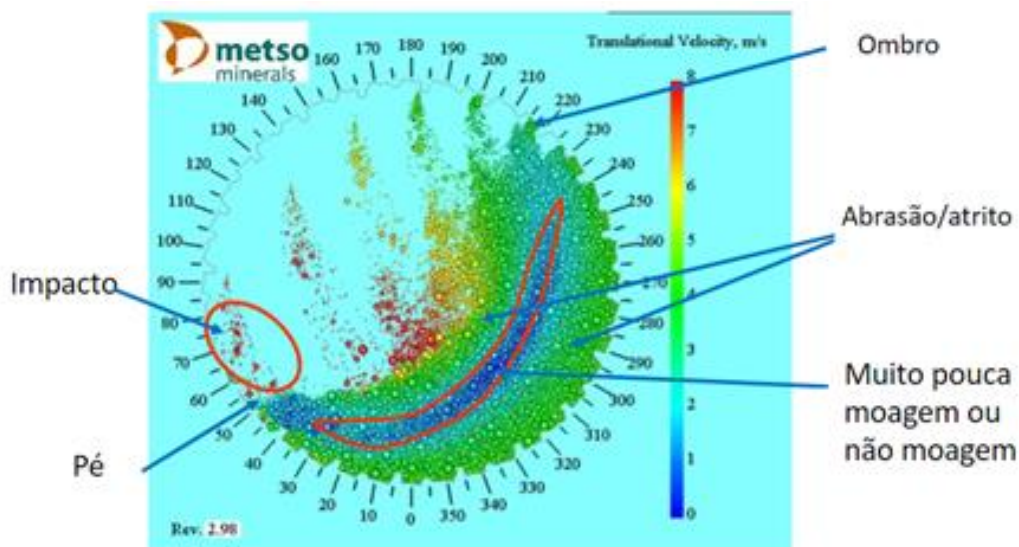


FIGURA 6: MECANISMO DE MOAGEM DE UM MOINHO AG. FONTE:(MARKSTROM, 2020)

Este mecanismo permite a realização de fragmentações diferenciais através de ações mecânicas menos violentas que permite uma libertação natural do minério ao longo das fronteiras entre os cristais presentes, com o mínimo de superfragmentações. (Leite, 1987; Napier-Munn, 1996)

2.3.2 Parâmetros Operacionais

A moagem é afetada por um conjunto de parâmetros ou variáveis cuja dependência permite o seu controle. É de notar que as características do minério, nomeadamente a dureza e tamanho das partículas, ditam grande parte do comportamento do material durante a moagem. A relação de redução exigida no processo determina o consumo específico de energia (kWh/t) requerido e conseqüentemente a potência e tonelagem do moinho. A potência está intrinsecamente ligada à velocidade do moinho e torque que por sua vez influenciam o calibre das partículas, a adição de água e o peso e volume da carga.

2.3.2.1 Distribuição Granulométrica da Alimentação

A importância deste parâmetro deriva do facto de o meio moente ser a própria alimentação pelo que, a sua alteração provocará uma alteração na distribuição granulométrica do meio e conseqüentemente, do mecanismo de fragmentação.

A distribuição de calibres da alimentação afeta a composição, tamanho e posição da carga e, portanto, afetam o torque ou binário e naturalmente a potência do moinho. Material mais fino tem um menor ângulo de repouso resultando numa menor distância do braço do torque. Por outro lado, o peso da carga da alimentação grosseira é inferior originando um menor torque. (Markstrom, 2020)

A resposta do processo a diferenças na distribuição granulométrica varia de moinhos AG para os SAG. Nos moinhos AG a alimentação deve conter uma quantidade suficiente de rochas de calibre grosseiro para que se dê o aumento da energia cinética para fracturação de rochas menores e para aumentar a frequência de colisões pelo que, a performance do moinho é melhor com alimentações mais grosseiras. Nos moinhos SAG verifica-se o oposto devido à predominância das bolas no mecanismo de fragmentação em relação ao material mais grosseiro que neste caso aumenta o “esforço” necessário para que a carga seja moída. A acumulação de material com calibre crítico derivado da erosão dos grãos, juntamente com uma fração de material com este calibre demasiado elevada, diminuirá a performance do moinho e a sua descarga. (Napier-Munn, 1996)

2.3.2.2 Taxa de Alimentação

O aumento da taxa de alimentação provoca um aumento do torque e da potência e diminuição da energia de moagem. Este parâmetro poderá ser controlado através da velocidade de rotação do moinho que ao ser aumentada permitirá um aumento da descarga. (Markstrom, 2020)

Quando ocorre uma mudança brusca da dureza do minério, a carga e o torque do moinho podem aumentar até ao seu limite máximo e a variação de velocidade não ser suficiente para controlar estes parâmetros sendo necessário diminuir a taxa de alimentação. (Napier-Munn, 1996).

2.3.2.3 Velocidade de Rotação do Moinho

A velocidade do moinho é estabelecida através de uma percentagem da velocidade crítica que corresponde à velocidade de centrifugação do moinho na qual não ocorre moagem, pois a carga adere ao tambor e acompanha o seu movimento. Existe uma relação entre a velocidade do moinho, a carga do moinho e o seu o levantamento (distância entre o pé e o ombro da carga no tambor) que é influenciado pelo tipo de levantadores.

A energia cinética aumenta com o aumento do levantamento da carga enquanto a energia de impacto traduzida na frequência de quebras aumentará continuamente com o aumento da velocidade do moinho até que esta atinja a velocidade de centrifugação. (Napier-Munn, 1996)

Este parâmetro permite regular a carga no interior do moinho, pois o aumento da velocidade do moinho e, conseqüentemente, a potência e rotações por minuto (rpm), promove a fragmentação por impacto de partículas grosseiras, permitindo o aumento da descarga do moinho. Por outro lado, a redução do efeito cascata aliado à destruição da carga moente, provoca um aumento dos calibres do produto do moinho.

Nos circuitos de moagem com controlo de velocidade do moinho variável têm como vantagens a versatilidade em relação a diferentes tipos de minério. Se o minério for mais macio/brando a velocidade do moinho irá diminuir como resposta à diminuição da carga e torque do moinho. Esta ação terá como consequência uma moagem mais abrasiva cujo produto possui uma granulometria mais fina. Pelo contrário, quando a alimentação é mais grosseira ou dura, a velocidade do moinho aumentará para manter a carga no *set-point* (valor de referência) definido, assim como o torque que resultará numa maior potência do moinho evitando assim a sua sobrecarga. (Viklund, 2006)

2.3.2.4 Torque ou Binário do Moinho

O torque (força x distância) poderá ser controlado pela velocidade do moinho que, ao ser aumentada provocará um aumento inicial do torque e posteriormente, uma diminuição devido ao aumento da taxa de moagem e conseqüente diminuição da carga do moinho tal como se poderá observar no gráfico da Figura 7.

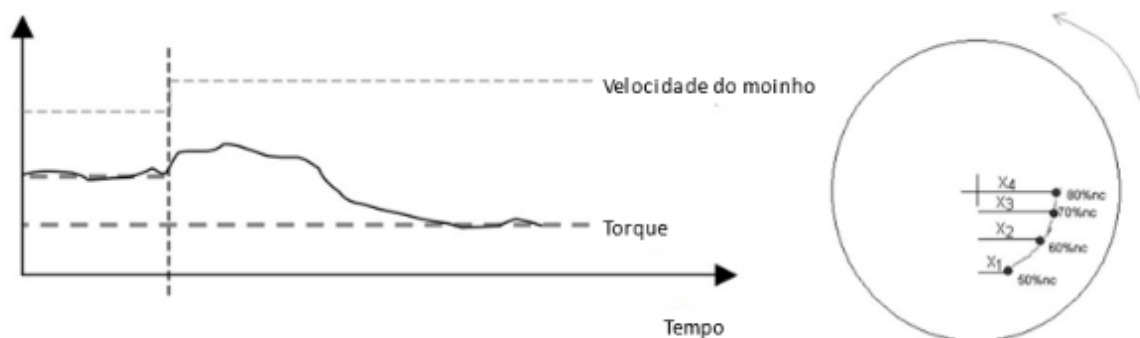


FIGURA 7: VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO MOINHO COM A VARIAÇÃO DO TORQUE E A VARIAÇÃO DO CENTRO DE GRAVIDADE DA CARGA COM A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE. FONTE:(VIKLUND, 2006)

A variação da velocidade provoca um deslocamento do centro de gravidade da carga resultando no aumento do comprimento do braço do torque. (Viklund, 2006) Se a massa da carga for maior, devido à densidade do minério, o torque também será maior.

Um aumento do torque acompanhado de uma diminuição da carga do moinho poderá ser indicação de problemas de aglomeração, isto é, retenção da polpa no moinho que resulta numa diminuição da potência, moagem ineficiente e baixa produção. Este fenômeno poderá estar associado a descarregadores ou aberturas de descarregadores ineficientes, ou cargas circulantes demasiado elevadas sendo uma medida corretiva a sua diminuição. (Markstrom, 2020)

2.3.2.5 Carga do Moinho

A carga do moinho, inferida através da pressão nas chumaceiras de alimentação (*feed end*) do moinho, poderá ser controlada através da velocidade do moinho, pela taxa de alimentação de minério e indiretamente, pelo torque do moinho. A adição de água ao moinho e a carga circulante também afetarão a carga. O controle deste parâmetro é essencial para estabilizar o fluxo e granulometria do produto, pois uma diminuição na carga, a uma taxa de alimentação de minério constante, gera um aumento da descarga de polpa e do tamanho das partículas devido à diminuição do atrito e da compressão sendo predominante o efeito de fragmentação graúda, caso aumente, ocorrerá precisamente o contrário devido ao deslocamento do pé da carga para a cascata e a saturação dos elevadores que proporcionará um aumento do tempo de residência e conseqüentemente uma diminuição do calibre do produto. Ao controlar a carga do moinho com a velocidade as variações no fluxo de polpa e o tamanho das partículas são minimizados. (Viklund, 2006)

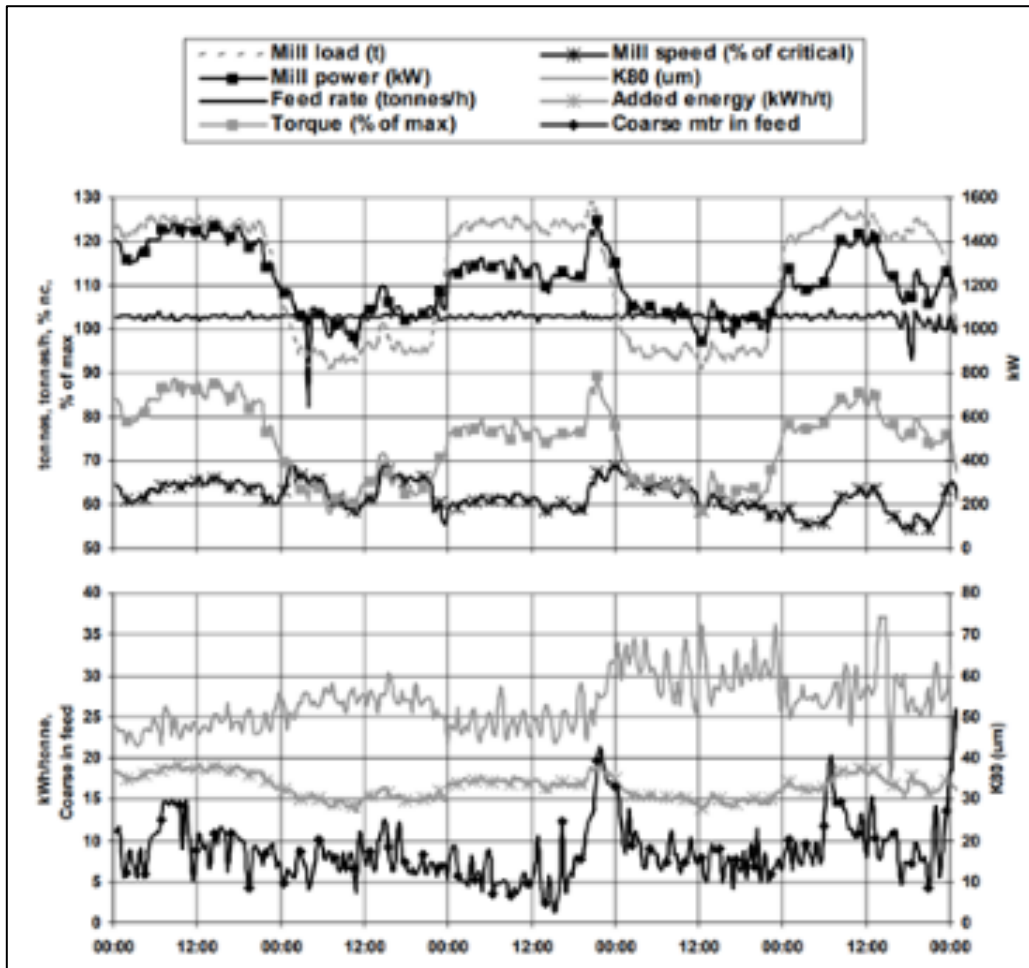


FIGURA 8: INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS VÁRIOS PARÂMETROS DA MOAGEM NUM MOINHO AG/SAG.
 FONTE:(VIKLUND, 2006)

2.3.2.6 Adição de Água

A água é adicionada no moinho de forma a manter uma percentagem de sólidos de aproximadamente 70 % e esta adição é controlada pelo desvio do valor da carga do moinho em relação ao seu *set-point* (valor de referência). O aumento da carga do moinho resulta numa diminuição da descarga do moinho que poderá ser aumentada através da adição de água. (Viklund, 2006).

A percentagem de sólidos da polpa afeta o processo de moagem, efeito visível quando se verifica uma diminuição da água que torna a carga mais viscosa, o tempo de retenção no moinho aumenta e o mecanismo de moagem dominante é o atrito resultando num produto mais fino. (Markstrom, 2020)

2.3.2.7 Carga Circulante

A carga circulante, caudal de espessado expresso como percentagem da alimentação fresca que retorna ao moinho, é influenciada pela distribuição granulométrica do produto da moagem sendo superior quanto a fração granulométrica dos grãos no produto for maior. O controlo da granulometria

do produto pode ser realizado através da variação de vários parâmetros tal como foi referido anteriormente. Assim, o aumento da velocidade de rotação do moinho e consequente diminuição da carga poderá ser uma das formas de aumentar a carga circulante. Os valores de carga circulante recomendados estão entre os 50 e os 80 % não devendo exceder os 150 %.

2.3.2.8 Consumo Específico de Energia (kWh/t)

Este parâmetro é resultado da potência consumida pela tonelagem de alimentação e depende da dureza do material.

2.3.3 Controlo Operacional

Existem diversas formas de controlar a operação dos moinhos AG/SAG desde o *design* da lavaria, que deve adaptar-se às características do minério, à otimização de desmontes que permitam a mistura de minério e a granulometria pretendida. (Napier-Munn, 1996) Algumas das principais estratégias de controlo do processo são:

- Alimentação controlada através da utilização de alimentadores de lagartas (*apron feeders*) e de tapetes rolantes de alimentação com controlo da massa por balanças: permitem a estabilidade da taxa de alimentação;
- Medição da potência do moinho: indica o quão perto a potência está do nível máximo garantindo que o moinho opera perto deste valor maximizando a alimentação e minimizando o consumo específico de energia (kWh/t);
- Controlo do nível de carga utilizando células de carga ou através da pressão nas chumaceiras: permite manter o nível da carga abaixo do nível máximo admitido pelo moinho;
- Medição da densidade da polpa na descarga: controla as propriedades reológicas da polpa na descarga.

2.3.4 Otimização

A procura pela otimização dos circuitos AG/SAG deve ser um processo constante que tem como objetivo a maximização da eficiência cujos critérios variam de circuito para circuito sendo, no entanto, imperioso a otimização dos seguintes pontos independentemente do circuito:

- Conhecimento das características mecânicas e elétricas do moinho:
 - Dimensão: tanto do interior da carcaça como das forras que devem ser medidas regularmente de forma a monitorizar o seu desgaste;
 - Parâmetros das forras de descarga: abertura da malha, área aberta e a localização das aberturas da grelha de descarga de forma a controlar a descarga de polpa; a abertura da malha também deve ser monitorizada pois é sujeita a desgaste;

- Capacidade do motor: verificação da potência máxima admitida pelo motor para monitorização de sobrecargas do moinho;
- Instrumentação: método mais eficaz de monitorização do desempenho (performance) do moinho que permite a obtenção de dados da operação para atuação momentânea e/ou aquisição de uma base de dados que permite o estudo e predição do comportamento do moinho. Os instrumentos mais utilizados são as balanças, células de carga ou sensores de pressão nas chumaceiras, indicadores de potência, caudalímetros, densímetros e analisadores de granulometria das partículas.
- Alimentação: a taxa de alimentação é limitada pelo volume e potência do moinho sendo também influenciada pela velocidade do moinho que, no caso de se pretender manter a carga constante, quando aumenta requer um aumento da taxa de alimentação.
- Granulometria do produto: a manipulação de todos os parâmetros anteriormente mencionados incluindo a abertura dos crivos/grelhas de descarga, a quantidade e tamanho da carga moente, a velocidade e potência do moinho e a taxa de alimentação contribuem para uma determinada granulometria do produto final que será o objetivo do processo em questão. Uma classificação eficiente do produto também é crucial pois evita o retorno de partículas indesejadas e através da manipulação do calibre de corte poder-se-á obter diferentes alimentações e conseqüentemente diferentes produtos. Quando se trata de um circuito constituído por dois estágios de fragmentação deve-se privilegiar a otimização da alimentação nos moinhos AG/SAG e do produto no segundo estágio.
- Consumo de energia: O consumo específico de energia (kWh/t) é uma medida de eficiência do processo porque, apesar de ser dependente do tipo de minério, também é influenciado pela granulometria da alimentação, carga, velocidade do moinho e carga moente que quanto maior for menor será o consumo de energia tendo como consequência negativa o desgaste das forras.

A otimização dos parâmetros do processo deverá ser encarada como um conjunto pois existem relações entre estes, tal como foi descrito nas seções anteriores, que afetam largamente o resultado final. As técnicas de simulação também permitem estudar o comportamento do minério e prever as características do produto final. (Napier-Munn, 1996)

2.3.5 Circuitos de moagem com moinhos AG/SAG

Os moinhos AG/SAG são aplicados a minérios competentes, ou seja, minérios que não se degradam facilmente e que garantam consumos energéticos razoáveis considerando que o consumo neste tipo de moagem é superior ao da moagem convencional. A opção por moinhos semi-autógenos prende-se com o facto de esta ser menos suscetível a variações nas características do minério. (Beraldo, 1987)

Estes moinhos são aplicados na moagem em um único estágio ou como moinho primário seguido de um moinho de bolas ou um moinho vertical de carga agitada a desempenhar a moagem secundária.

Os principais circuitos de moagem utilizados atualmente na indústria são os resumidos na Tabela 2.

TABELA 2: PRINCIPAIS CIRCUITOS DE MOAGEM. FONTE: ADAPTADO DE (BERALDO, 1987)

Circuito	Descrição
Moinhos de barras em circuito aberto	Aplicados à moagem grosseira sendo a granulometria do produto na ordem de 1 mm ou mais
Moinhos de bolas em estágio único	Muito comum em minério de cobre, eficiente apenas quando antecedido de britagem fina (10 a 15 mm)
Moinho AG/SAG em estágio único	Pouco utilizado devido à sua ineficiência energética
Moinhos de barras em circuito aberto precedido de moinhos de bolas em circuito fechado	É o circuito mais energeticamente econômico sendo, no entanto, o que requer maior investimento. O seu controlo é fácil e permite alimentações com granulometria de 25 a 30 mm
Moinhos AG/SAG seguidos de moinhos de bolas em circuito fechado	Apresentam baixo investimento, pois evita os custos inerentes à britagem fina, os consumos energéticos são razoáveis e o consumo de metais é menor, no entanto, são condicionados pelas características do minério
Circuito A-B-C: moinho autógeno, britador e moinho de bolas	O britador é utilizado para fragmentar o calibre crítico do moinho autógeno. Esta opção impossibilita a utilização de moinhos SAG pois a carga moente danificaria o britador

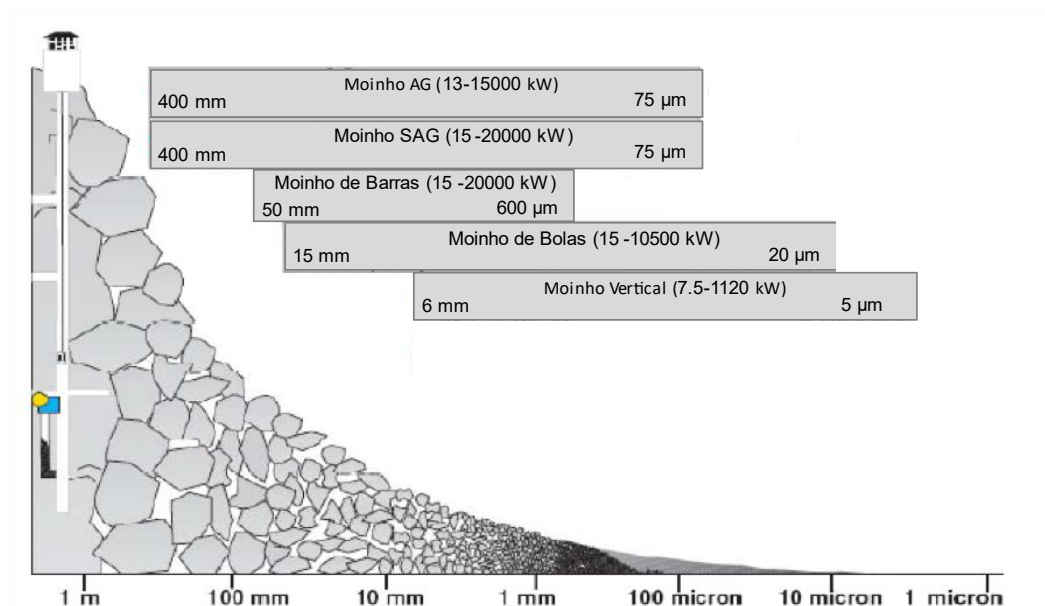


FIGURA 9: GAMAS DE POTÊNCIAS E GRANULOMETRIAS APLICADAS A CADA TIPO DE EQUIPAMENTO DE COMINUIÇÃO. FONTE: ADAPTADO DE (MARKSTROM, 2020)

2.3.6 Vantagens da Moagem Autógena

Os circuitos constituídos por moinhos SAG / moinho de bolas de alta capacidade unitária predominam pelos seus contributos para economias substanciais em custos de capital e operacionais, o que, por sua vez, viabiliza operações de baixo teor e alta tonelagem, como minérios de cobre e ouro.

Além disso, estes tipo de circuitos apresenta diversas vantagens em relação aos circuitos convencionais, nomeadamente uma maior versatilidade, no caso dos moinhos AG, menor desgaste das forras, uma vez que não é utilizada carga moente, menores custos operacionais, uma vez que não é necessário adquirir carga moente ou essa quantidade é menor em comparação com os moinhos convencionais, permite o processamento de maiores tonelagens e, uma vez que são eliminadas etapas de britagem/moagem, evita custos de manutenção. (Markstrom, 2020)

3. Caso de Estudo

Neste capítulo, será feita uma apresentação geral da empresa onde o presente trabalho foi desenvolvido. De seguida, haverá uma descrição da Lavaria do Zinco, quer na sua configuração atual, quer na sua configuração futura com o PEZ. Posteriormente, será realizada uma apresentação de alguns equipamentos, parâmetros de operação e finalmente o balanço de massas da Lavaria do Zinco na Fase 1B do PEZ.

3.1 Apresentação da Empresa

A mina de Neves-Corvo localiza-se na parte ocidental da Faixa Piritosa Ibérica (IPB), que se estende pelo sul de Espanha até Portugal. Esta mina é gerida pela empresa SOMINCOR, sendo esta uma subsidiária do grupo canadiano Lundin Mining. (SOMINCOR, 2019).

Os depósitos minerais de Neves-Corvo são classificados como sulfuretos maciços vulcano sedimentares, geralmente ocorrem como lenticulas de sulfuretos maciços polimetálicos (cobre, zinco, estanho, chumbo). Atualmente exploram-se cinco massas minerais, compreendendo Neves, Corvo, Graça, Zambujal e Lombador. Os principais meios de acesso à mina são por um poço e uma rampa a partir da superfície.

O processamento mineral em Neves-Corvo é dividido em duas lavarias. A lavaria de Cu com uma capacidade de aproximadamente 2,7 milhões de toneladas por ano (mtpa), e a lavaria de zinco, de capacidade 1,1 mtpa, estando em processo de expansão para 2,5 mtpa de capacidade. Na lavaria de zinco é ainda produzido um concentrado de chumbo. O presente trabalho focar-se-á exclusivamente nesta lavaria e mais concretamente nas alterações ao nível da moagem, com a introdução de um moinho AG/SAG (Parte do Projeto de Expansão do Zinco - PEZ). Os concentrados de cobre e zinco, provenientes destas unidades de processamento são transportados por via-férrea, para uma instalação portuária em Setúbal, de onde são enviados para diversos compradores. Já o concentrado de Pb é transportado por camião até ao porto de Sines.

Diariamente a operação rege-se pelos valores de segurança, respeito, integridade e excelência (Lundin Mining, 2021).

3.2 Lavaria do Zinco

3.2.1 Configuração Atual

Na lavaria de Zn é realizada a produção de concentrados de zinco e chumbo, a partir do tratamento de minérios complexos polimetálicos. Esta produção tem sido relativamente estável, situando-se entre 1,0 e 1,1 mtpa.

A lavaria do zinco é constituída por três circuitos de flutuação distintos: circuito Cu-Pb, circuito principal de zinco e circuito de rejeitos de zinco (RZ).

No circuito Cu-Pb pretende-se flutuar calcopirite e galena, com depressão de blenda e restantes minerais de ganga, como a pirite, de forma a ser possível produzir um concentrado de Cu-Pb vendável e reduzir a contaminação destes elementos no circuito de flutuação de zinco, que se segue a este primeiro circuito.

No circuito de zinco, a blenda é flutuada com depressão da pirite. Por fim, o rejeitado do circuito principal de zinco é reprocessado no circuito RZ de forma a recuperar parte do zinco que foi encaminhado para o rejeito do circuito principal de zinco. (SOMINCOR, 2020).

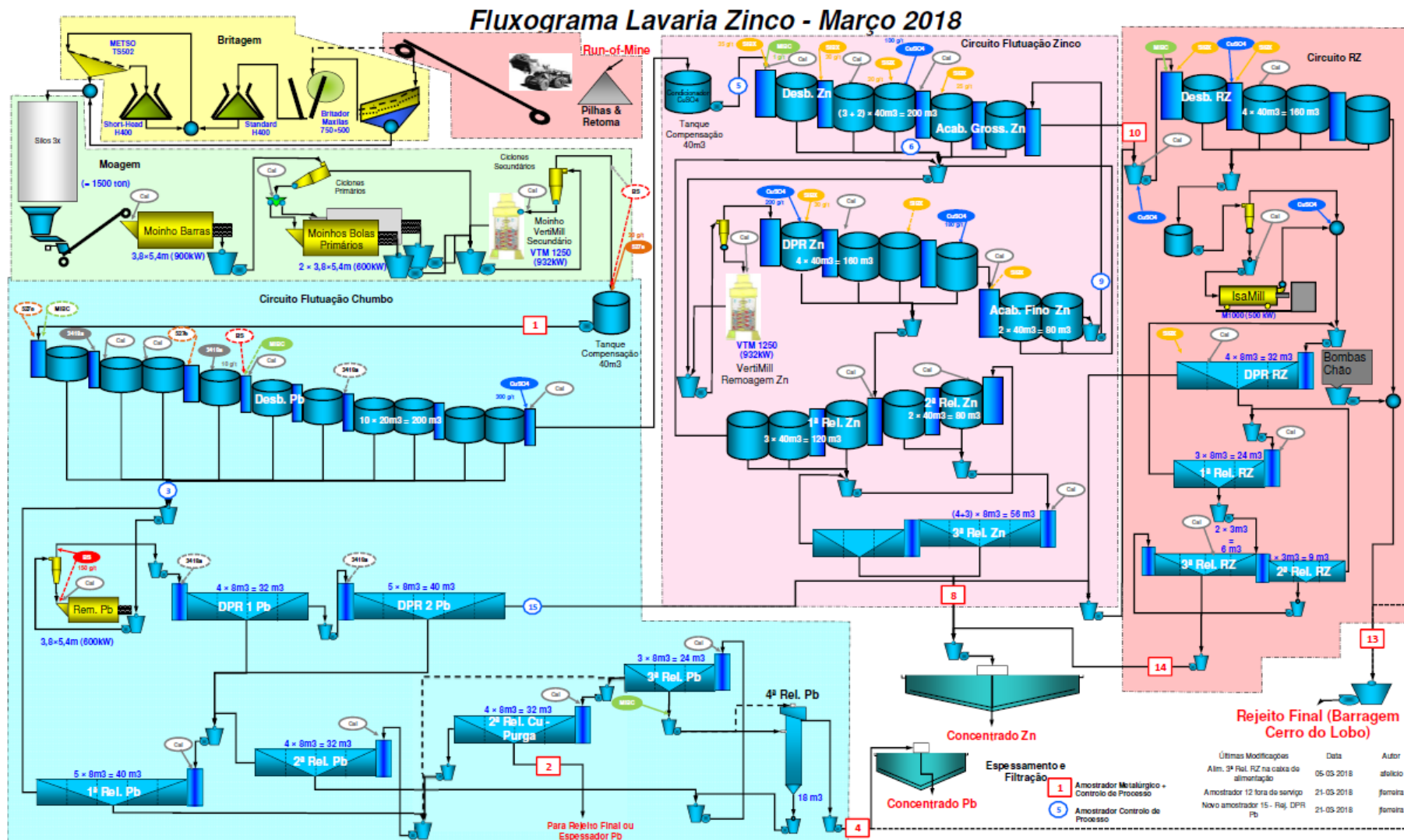


FIGURA 10: FLUXOGRAMA LAVARIA DO ZN - CONFIGURAÇÃO ATUAL. FONTE: (SOMINCOR, 2018)

3.2.2 Britagem e Moagem – Configuração Atual

Os minérios provenientes do fundo da Mina, britados para granulometrias <250 mm são depositados no parque de minérios. O minério MZ é classificado a 19 mm na Pré-Crivagem. O produto infracrivo é transferido por um tapete rolante diretamente para o tapete dos finos, que alimenta os silos. O produto supracrivo é depositado em pilha, e retomado, por pá carregadora, para a instalação de britagem do zinco. Na britagem o minério é britado num britador de maxilas de 750 mm x 500 mm, com descarga de 50 mm de abertura. O produto da britagem primária com $d_{100} = 50$ mm é descarregado seguindo para britador secundário, britador giratório Standard modelo H400. O produto da britagem secundária com $d_{100} = 20$ mm é descarregado num crivo com 1,2 m x 2,4 m de deck simples com redes de malha de 22 mm. O supracrivo com $d_{100} > 10$ mm alimenta um terceiro estágio de britagem constituído por britador modelo H400, igual ao anterior, cuja descarga recircula para o crivo. O infracrivo com $d_{100} < 19$ mm, constitui, juntamente com o infracrivo da Pré-Crivagem, o produto final da Britagem e será transportado para um dos três silos existentes.

O circuito de moagem é constituído por três estágios: moinho de barras, moinho de bolas primário e moinho de bolas secundário (VertiMill).

O material que sai dos silos vai alimentar o primeiro estágio do circuito de moagem, que se inicia por um moinho de barras que funciona em circuito aberto e onde é feita a 1ª adição de água ao circuito. O moinho de barras é acionado por um motor de 900 kW e tem dimensões $D \times L = 3,8 \times 5,4$ m. O produto do moinho de barras é classificado nos ciclones primários. O *overflow* avança para a bomba de descarga do VertiMill, enquanto o *underflow* recircula para o moinho de bolas primário.

A bomba de descarga do VertiMill alimenta, juntamente com o *overflow* dos ciclones primários, os ciclones secundários. O *underflow* recircula para o moinho de bolas secundário (VertiMill VTM-1250, 900 kW), enquanto o *overflow*, com uma granulometria estimada de $D_{80} \approx 65 \mu\text{m}$, constitui a alimentação ao circuito de flutuação, gravita para o tanque de compensação de alimentação ao circuito de flutuação do Cu-Pb. (SOMINCOR, 2020).

3.3 Projeto de Expansão do Zinco (PEZ)

O Projeto de Expansão do Zinco (PEZ), surgiu da necessidade da Somincor aumentar a sua produção de Zinco com a descoberta do jazigo do Lombador Norte e Sul.

Foram realizadas várias campanhas de prospeção de modo a caracterizar o jazigo descoberto, que mostraram elevados teores de Zinco, estando, no entanto, situados a uma profundidade de 1000 a 1200 metros.

Uma vez concluídos os estudos de caracterização do jazigo do Lombador e feita a análise económica e financeira do que viria a ser o PEZ, decidiu-se avançar com o mesmo. O PEZ não só inclui modificações a nível da estrutura de fundo da mina, mas também ao nível da modificação e construção de novas instalações à superfície.

As principais modificações ao nível do fundo da mina incluíam:

- Uma nova britagem no nível 260, de modo a acomodar o aumento da produção do Lombador.
- Um novo sistema de tapetes transportadores, responsáveis por ligar a nova britagem do nível 260 ao sistema atual. Este novo sistema de tapetes transportadores é constituído por 3 telas, cada uma com aproximadamente 1 km de comprimento (Figura 11).

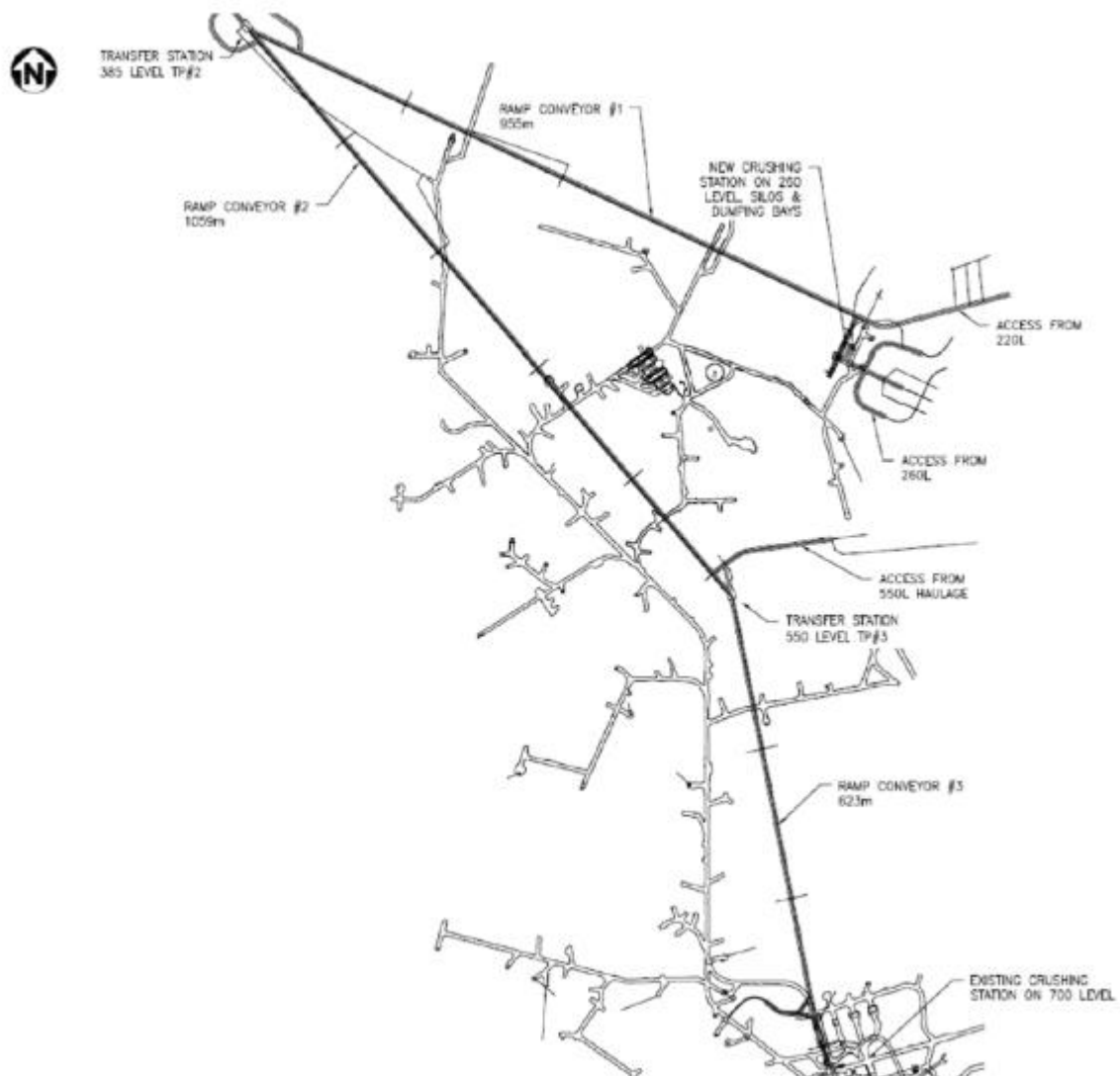


FIGURA 11: NOVO SISTEMA DE TAPETES TRANSPORTADORES INSTALADO PELO PEZ. FONTE: (SOMINCOR, 2017)

Relativamente às modificações necessárias na superfície, o PEZ incluí:

- Construção de um novo edifício para a instalação de um Moinho AG/SAG (objeto de estudo desta Dissertação);
- Construção de um novo edifício para a instalação de novas células de flutuação (100 m³) (Figura 12);
- Instalação de novas células de Flutuação (100 m³) na Lavaria de Zinco Existente;

- Nova instalação de Ciclones de Rejeitados;
- Instalação de um novo Espessador de Pasta na Central do Cerro do Lobo;
- Instalação de novos filtros de concentrado.



FIGURA 12: NOVAS CÉLULAS DE FLUTUAÇÃO INSTALADAS NA ATUAL LAVARIA DO ZN

3.3.1 Lavaria do Zinco – Configuração PEZ

Com a conclusão do Projeto de Expansão do Zinco (PEZ) a lavaria do Zinco sofrerá algumas alterações, não relativamente aos produtos obtidos (Concentrado de Zinco e Chumbo) mas na sua configuração e capacidade de tratamento.

Na sua configuração final, a Lavaria do Zinco terá capacidade para processar 2,5 mtpa. Os circuitos estarão divididos da seguinte forma: Circuito Principal do Chumbo e Circuito Principal do Zinco. À data da escrita desta dissertação, o circuito RZ não está considerado e apenas está considerado o aproveitamento de metade da quantidade de chumbo que entra na Lavaria, chamado de “Half Pb”. O chumbo que não é processado, é diretamente enviado para os rejeitos finais.

Por uma questão de planeamento, decidiu-se dividir o Projeto em várias fazes: Fase 1A e 1B, Fase 2 e finalmente Fase 3. As diferenças entre as 3 fases, prendem-se com os equipamentos que são colocados em funcionamento à medida que a sua construção e comissionamento estão concluídos. A fase 1B (Figura 13), foco desta dissertação, é caracterizada pelo funcionamento do Moinho AG

alimentado por minério de Zinco, com uma alimentação na ordem das 140-150 t/h a alimentar a Lavaria do Zinco na configuração atual, com um dos Vertimill existentes a funcionar como moagem secundária. Durante esta fase, a tonelagem máxima está limitada às referidas 140-150 t/h, pois existe uma limitação de tratamento da Lavaria de Zinco na configuração atual. Esta limitação deixa de existir uma vez que as novas células de flutuação instaladas pelo PEZ estejam em funcionamento. Além da limitação na flutuação, existe ainda uma limitação ao nível dos Ciclones de Rejeitados, também ela ultrapassada com a entrada em funcionamento da nova Instalação de Ciclones de Rejeitados do PEZ.

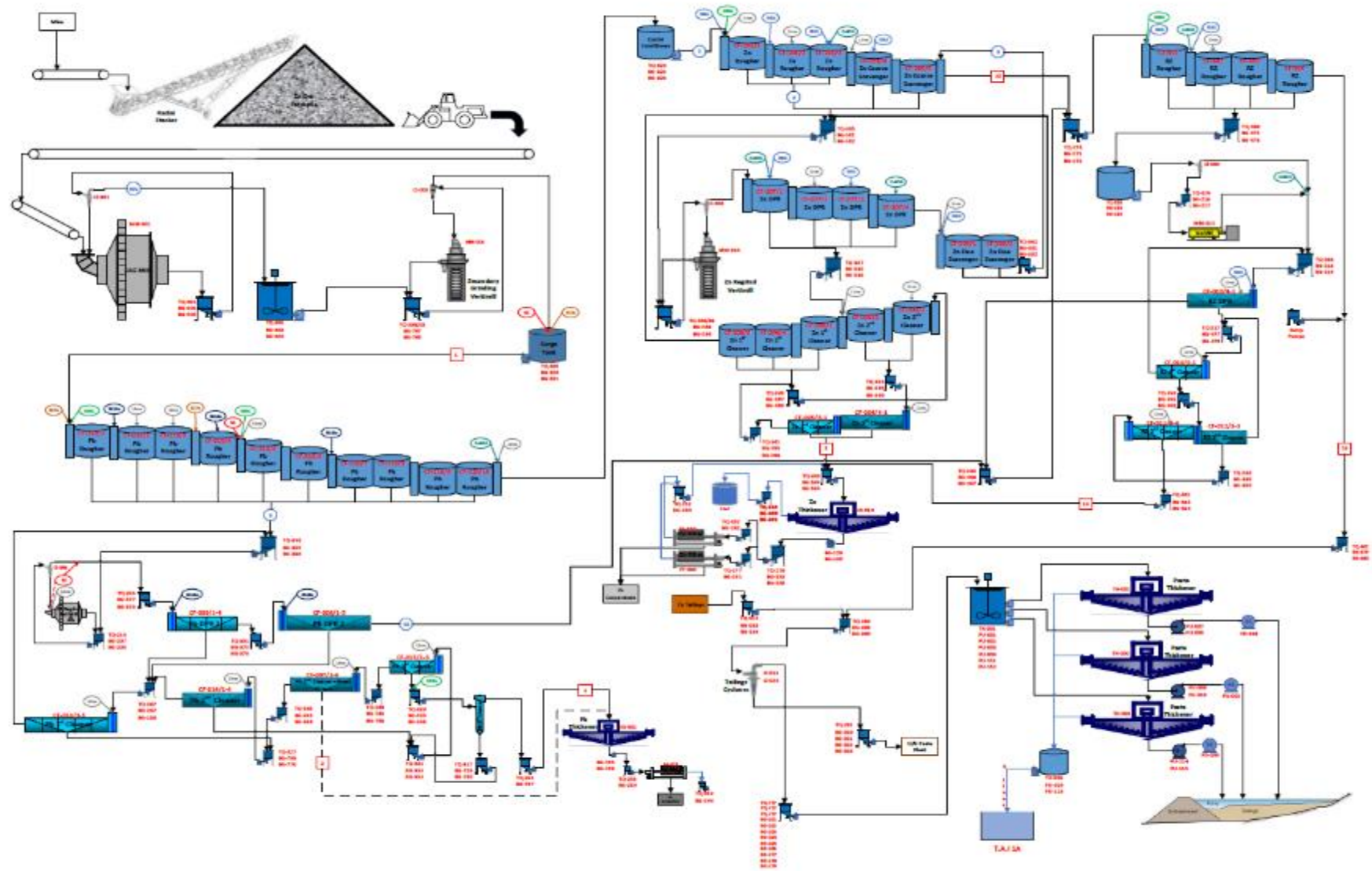


FIGURA 13: FLUXOGRAMA LAVARIA DO ZN - FASE 1B PEZ

3.3.1.1 Moagem – Configuração PEZ

Com o início do PEZ, o minério de Zinco proveniente do fundo da mina, britado pelos Britadores de Maxilas Primários para granulometrias <200 mm é colocado através de um Empilhador Radial (*Radial Stacker*) num novo parque de minério, com capacidade para 30 000 toneladas de Minério de Zinco.

O minério de Zinco armazenado em pilha neste novo parque de minério, é transportado através de Pá Carregadora para a Torva de Alimentação do Tapete de Alimentação do Moinho AG (Figura 14). Esta torva está equipada com um Alimentador de Lagartas (*Apron Feeder*) (Figura 15) que serve como amortecedor dos impactos do minério descarregado na Torva, além de permitir controlar a descarga para o Tapete de Alimentação do Moinho AG.



FIGURA 14: TORVA DE ALIMENTAÇÃO DO MOINHO AG/SAG COM ALIMENTADOR DE LAGARTAS



FIGURA 15: ALIMENTADOR DE LAGARTAS. FONTE: (SOMINCOR, 2019)

O Tapete de Alimentação do Moinho AG, descarrega o minério de zinco para o interior do moinho (Figura 16), onde este será moído autógenamente, sem recurso a carga moente. Como referido anteriormente, o calibre máximo de alimentação ao moinho (F100) é de 200 mm e um F80 de 150 mm. No caso dos moinhos AG, o calibre de alimentação e a curva de distribuição granulométrica têm grande importância para o correto e melhor desempenho do moinho. Não havendo uma boa distribuição de calibres, não se conseguirá uma moagem eficiente, pois não haverá minério com calibre necessário para moer o restante.

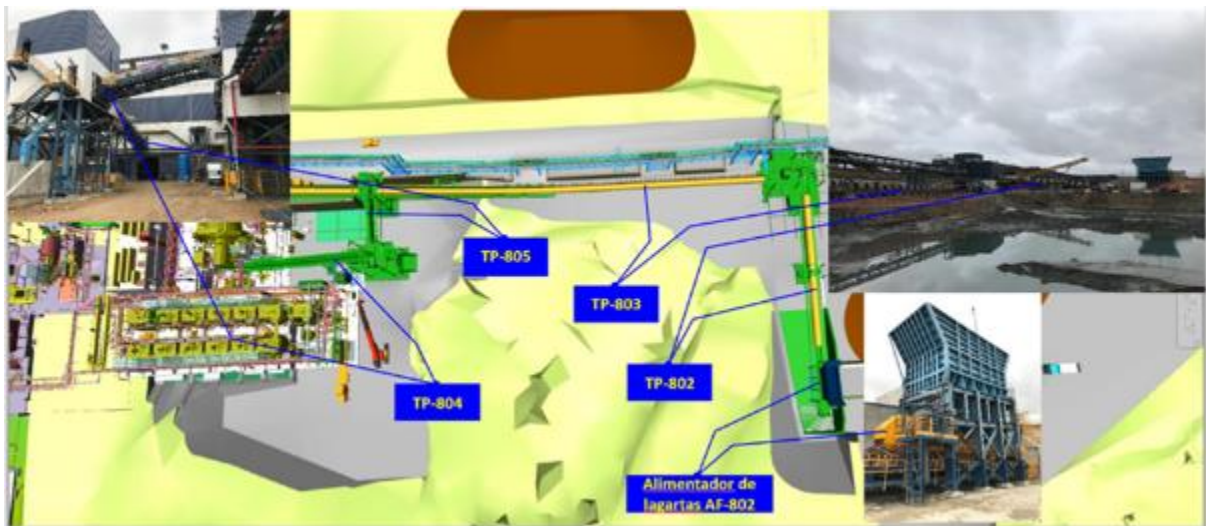


FIGURA 16: CIRCUITO DE TRANSPORTE DE MINÉRIO PARA ALIMENTAÇÃO AO MOINHO AG/SAG

Ao contrário dos moinhos convencionais, os moinhos AG/SAG não funcionam por transbordo, mas sim com recurso a Levantadores de Polpa (*Pulp Lifters*), responsáveis por fazerem a evacuação da polpa do moinho, através das grelhas de descarga. No caso específico do moinho AG de Neves-Corvo, as grelhas de descarga têm aberturas com 25 mm de dimensão. Uma vez evacuada a polpa através das grelhas de descarga, esta passará ainda por um crivo giratório (*Trommel*) com aberturas rectangulares de 12 x 55 mm. A polpa, constituída por água e partículas de minério e ganga com calibre inferior às aberturas das grelhas de descarga e inferior às aberturas do crivo giratório, são descarregadas no Tanque de Descarga do Moinho AG. Partículas com calibre inferior às aberturas das grelhas de descarga do moinho mas superior à dimensão das aberturas do crivo giratório, os chamados *Pebbles*, seguem um circuito alternativo (circuito dos *Pebbles*) onde através de tapetes, são retirados de circulação, através de um Portão de Divergência para uma torva, ou então podem voltar a recircular para o moinho.

O moinho AG, assim como o restante circuito de moagem, opera em circuito fechado. A polpa proveniente do moinho AG, é bombeada para os Ciclones Primários onde será realizada a hidroclassificação das partículas. O P80 do *Overflow* dos Ciclones Primários é de 75 μm . O *Underflow* dos Ciclones Primários regressa ao moinho.

A segunda etapa do processo de moagem, é realizada por um VertiMill também ele em circuito fechado. O *Overflow* dos Ciclones secundários (alimentação à flutuação), tem um P80 de 53 μm .

Na Tabela 3, é possível ver uma comparação entre os calibres e consumos específicos de energia na configuração atual da Lavaria do Zinco e na configuração do Projeto de Expansão do Zinco.

TABELA 3: COMPARAÇÃO ENTRE OS F80, P80 E CONSUMOS ESPECÍFICOS DE ENERGIA ENTRE A CONFIGURAÇÃO ATUAL DA LAVARIA DO ZN E A CONFIGURAÇÃO DO PEZ

		Moinho AG/SAG	Moinho Barras	Moinho Bolas Primário	Vertimill Secundário
Atual	F80 (µm)	-	13892	1145	326
	P80 (µm)	-	1060	265	188
	Consumo Específico de Energia (kWh/t)	-	5.2	3.1	5.6
PEZ	F80 (µm)	150000	.	.	75
	P80 (µm)	75	.	.	53
	Consumo Específico de Energia (kWh/t)	16.5	.	.	4.3

Além dos dois moinhos já referidos, o circuito de moagem é ainda constituído por outros moinhos, um VertiMill de Remoagem de Zinco, um moinho de Bolas de Remoagem de Chumbo e um IsaMill de Remoagem do Circuito RZ.

A introdução de um moinho AG/SAG no circuito de moagem permitiu eliminar todo o circuito de britagem da Lavaria do Zinco e também o Moinho de Barras e Moinho de Bolas da configuração anterior que funcionava como moagem primária. A eliminação do circuito de britagem da Lavaria do Zinco, bem como a retirada de serviço do Moinho de Barras, permite uma poupança significativa em manutenção e em tempos de paragem.



FIGURA 17: ETAPAS DE BRITAGEM E MOAGEM ATUAIS COMPARATIVAMENTE À CONFIGURAÇÃO DO PEZ

3.3.1.2 Caracterização Minério

De modo a fazer uma caracterização do minério que iria alimentar o moinho AG/SAG, foram recolhidas e testadas três amostras de minério em 2017. As três amostras recolhidas, deveriam representar 3 níveis de dureza diferentes, minério brando, minério de dureza média e minério duro. Uma vez realizados os testes, verificou-se que contrariamente ao nome atribuído a cada uma das amostras, a amostra mais branda, medida através de “SAGDesign Test”, corresponde à amostra identificada como “Minério de Dureza Média Lombador”. (Orway Mineral Consultants, 2020)

A Tabela 4 sumariza os resultados obtidos para as amostras testadas e os parâmetros calculados associados. A energia específica prevista para o pinhão do Moinho AG/SAG (W_{SDT} , em kWh/t) é válida para um F_{80} de 152.4 mm com redução para um T_{80} de 1.7 mm. Os testes de BWI foram conduzidos com uma malha de crivo final de 75 μ m. (Orway Mineral Consultants, 2020)

TABELA 4: SUMÁRIO DOS TESTES DE COMINUIÇÃO REALIZADOS ATRAVÉS DE "SAGDESIGN". FONTE: ADAPTADO DE (ORWAY MINERAL CONSULTANTS, 2020)

Identificação da Amostra	Massa Específica do Minério	W_{SDT} (kWh/t)	S_d-BWI (kWh/t)
MZP Lombador Média	4.42	7.99	10.39
ZEP FS Corvo/ Lombador Branda	4.39	9.21	10.9
MZP Lombador Dura	3.98	11.69	13.05

Além das 3 amostras analisadas especificamente para caracterizar o minério de alimentação ao moinho AG/SAG, existem ainda outras amostras que foram analisadas ao longo do tempo. Os valores médios para os parâmetros A_{xb} (Teste de Resistência à quebra por Impacto – *drop weight test*), RWI (Índice de Energia de Bond para Moagem em Moinho de Barras), BWI (75 μ m) (Índice de Energia de Bond para Moagem em Moinho de Bolas com malha de moagem de 75 μ m), AI (Índice de Abrasividade) e SG (Massa Específica do Minério), podem ser encontrados na Tabela 5

TABELA 5: SUMÁRIO DOS VALORES MÉDIOS OBTIDOS PARA O TOTAL DE AMOSTRAGEM. FONTE: ADAPTADO DE (ORWAY MINERAL CONSULTANTS, 2020)

Parâmetros do Minério	Valores Médios do total de amostragens realizadas
A_{xb}	49.9
RWI (kWh/t)	14.4
BWI (75μm) (kWh/t)	12.1
AI (g)	0.5
SG	4.33

3.3.2 Moinho AG/SAG

3.3.2.1 Dimensões

O moinho AG/SAG instalado em Neves-Corvo tem as seguintes dimensões: D x L = 8,5 m x 5,4 m EGL (Figura 18), tornando-o por isso um dos maiores moinhos AG/SAG a nível mundial a funcionar com recurso apenas a um Pinhão de ataque.

Relativamente a limites de carga total do moinho, a carga normal em operação situa-se nos 28 %, a carga máxima em operação nos 30 % e estando limitado mecanicamente a uma carga total máxima de 35 %.

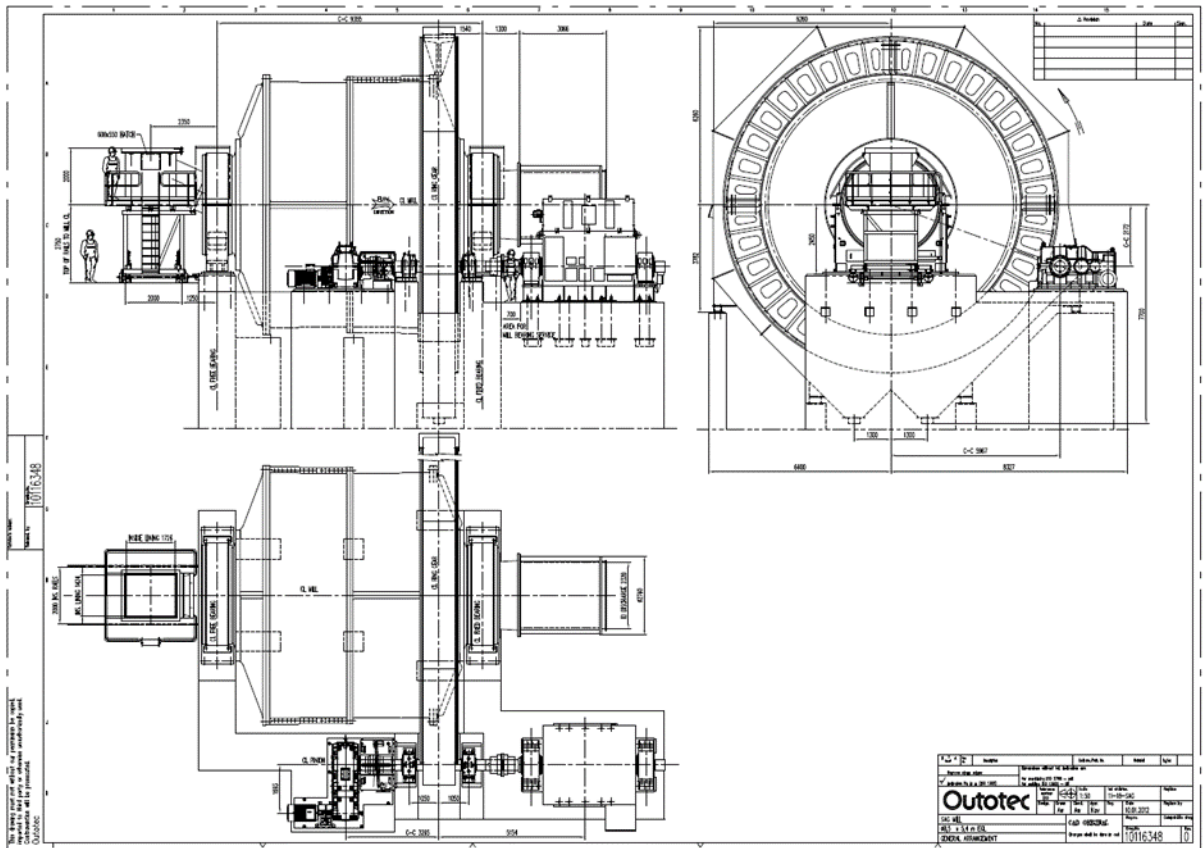


FIGURA 18: DESENHO ESQUEMÁTICO MOINHO AG/SAG. FONTE: (SOMINCOR, 2011)



FIGURA 19: MOINHO AG/SAG INSTALADO EM NEVES-CORVO

3.3.2.2 Motor

Relativamente à potência instalada, o moinho é acionado por um motor com 8,5 MW (Figura 20) o que permite ter alguma potência disponível para o seu controlo uma vez que normalmente trabalhará na ordem dos 6,3 MW. O motor instalado permite que o moinho rode a uma velocidade mínima de 8,8 rpm e uma velocidade máxima de 11,74 rpm (valores de desenho). Com um valor médio de 71% da sua velocidade crítica.



FIGURA 20: MOTOR DE ACIONAMENTO PRINCIPAL DO MOINHO AG/SAG

3.3.2.3 Forras

Como qualquer outro moinho, o moinho AG/SAG está equipado com forras no seu interior. Não só estas forras são responsáveis pela proteção contra os embates do minério no seu casco, como também são responsáveis pelo levantamento/elevação da polpa e sua evacuação. O moinho AG/SAG de Neves Corvo está equipado com forras metálicas (liga cromo molibdénio) e levantadores de polpa radiais.

Um jogo de forras para um moinho AG/SAG é muito mais complexo que um jogo de forras para um moinho convencional, uma vez que o modo de funcionamento de um moinho AG/SAG é totalmente diferente dos moinhos convencionais. No caso de Neves Corvo, o jogo de forras utilizado é composto por 15 peças diferentes (Tabela 6) (Figura 21), cada uma com a sua função, são elas:

TABELA 6: COMPOSIÇÃO DO JOGO DE FORRAS DO MOINHO AG/SAG DE NEVES-CORVO

Item	Código	Quantidade	Descrição	Peso (kg)	
				Unidade	Total
1	GA-M5557	12	Forra Interior da Alimentação	806	9672
2	GA-M5558	12	Forra Intermédia da Alimentação	1002	12024
3	GA-M5559	24	Forra Exterior da Alimentação	1012	24288
4	GA-M5560	44	Anel de Enchimento	239	10516
5	GA-M5561	22	Forra do Casco (alimentação – perfil alto)	2256	49632
6	GA-M5562	22	Forra do Casco (alimentação – perfil baixo)	1923	42306
7	GA-M5563	22	Forra do Casco (descarga – perfil alto)	1868	41096
8	GA-M5564	22	Forra do Casco (descarga – perfil baixo)	1594	35068
9	GA-M5565	24	Levantador de Polpa Exterior	1626	39024
10	GA-M5566	12	Levantador de Polpa Intermédio	704	8448
11	GA-M5567	24	Grelha de Descarga Exterior – 25 mm abertura	1063	25512
12	GA-M5568	12	Grelha de Descarga Interior – 25 mm abertura	1372	16464
13	GA-M5569	12	Levantador de Polpa Interior	2496	29952
14	GA-M5570	2	Descarregador de Polpa Superior	1137	2274
15	GA-M5571	2	Descarregador de Polpa Inferior	988	1976
					348252

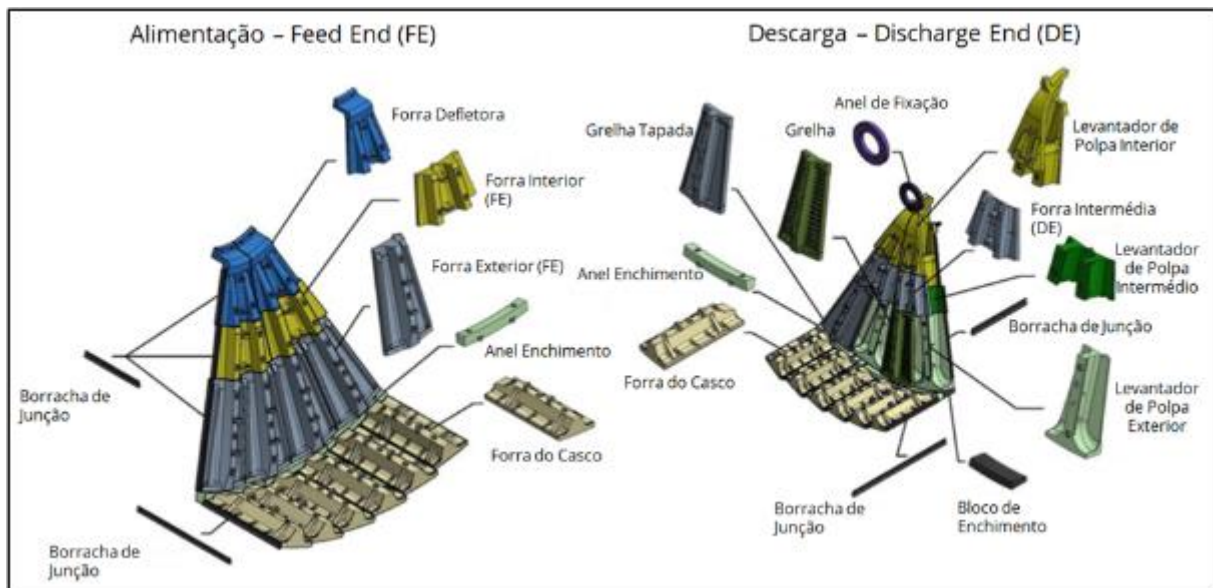


FIGURA 21: ESQUEMA ILUSTRATIVO DOS LOCAIS DE INSTALAÇÃO DE UM JOGO DE FORRAS NUM MOINHO AG/SAG. FONTE: ADAPTADO DE (BALL MILL DIAGRAM SAG MILL SEMIAUTOGENOUS GRINDING MILL)

A identificação das peças que constituem um jogo de forras é efetuada recorrendo à numeração que as identifica (Figura 22), composta por um número e uma sigla, ou FE (*Feed End*) ou DE (*Discharge End*) (Figura 23), identificando se as mesmas pertencem à zona de alimentação ou descarga do moinho.



FIGURA 22: IDENTIFICAÇÃO DE UM COMPONENTE DE UM JOGO DE FORRAS DE UM MOINHO AG/SAG



FIGURA 23: SIGLAS DE IDENTIFICAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO OU DESCARGA

As forras do casco, também chamadas de levantadores/elevadores (*lifters*) são responsáveis por proteger o casco do moinho dos impactos de minério, e no caso de moinhos SAG, da carga moente também. Além da função de proteção, são também responsáveis por elevar a polpa no interior do moinho, gerando os impactos e abrasão responsáveis pela moagem das partículas (Figura 24).



FIGURA 24: JOGO DE FORRAS COMPLETO INSTALADO NO INTERIOR DO MOINHO

Os moinhos AG/SAG, contrariamente aos moinhos tradicionais que funcionam por transbordo, estão equipados com grelhas de descarga na sua saída. Estas grelhas são responsáveis por impedir que as partículas que ainda não possuem calibre necessário para serem evacuadas do moinho, permaneçam no seu interior, até atingirem o calibre desejado. O moinho AG/SAG de Neves-Corvo está equipado com grelhas de descarga com aberturas de 25 mm (Figura 25 e Figura 26).



FIGURA 25: A) GRELHA DE DESCARGA VISTA INFERIOR, B) GRELHA DE DESCARGA VISTA SUPERIOR

Uma vez atingido o calibre necessário de partículas para serem evacuadas do moinho, estas atravessam as grelhas de descarga e são evacuadas do moinho, através de outro componente do jogo de forras, os chamados Levantadores de Polpa (*Pulp Lifters*).



FIGURA 26: GRELHAS DE DESCARGA INSTALADAS NO INTERIOR DO MOINHO

Os levantadores de polpa, funcionam como “colheres” que recolhem a polpa na parte inferior do moinho e que a descarregam para o orifício central de descarga, à medida que o moinho vai rodando. Existem dois tipos de levantadores de polpa, os levantadores de polpa radiais e os levantadores de polpa curvos (*Curved Lifters*). Os levantadores de polpa utilizados no moinho de Neves-Corvo são levantadores de tipo radial.

As forras são um dos principais custos operacionais em qualquer instalação de moagem, a par da carga moente. No caso específico das forras do moinho AG/SAG de Neves-Corvo, o tempo de vida das forras situa-se entre os 6-9 meses, com cada conjunto de forras a custar perto de 1 milhão de euros.

3.3.2.4 Crivo Giratório (*Trommel*)

O crivo giratório é a última etapa de classificação à saída do moinho. Este é responsável pela separação da polpa e dos *pebbles* em dois circuitos distintos. A polpa, constituída por partículas de calibre inferior à abertura da malha do crivo giratório (12x55 mm) e água, passa através deste e segue para os ciclones primários onde será novamente classificada. Os *pebbles*, de calibre superior à malha do crivo giratório, seguem o seu circuito específico ou voltando para o moinho ou então sendo retirados do circuito.



FIGURA 27: CRIVO GIRATÓRIO DA DESCARGA DO MOINHO

As características do Crivo Giratório podem ser encontradas na Tabela 7.

TABELA 7: CARACTERÍSTICAS DO CRIVO GIRATÓRIO

	Desenho
Diâmetro efetivo (m)	2.3
Comprimento Efetivo (m)	3.1
Abertura da Malha (mm)	12x55
Área das Aberturas (%)	21

3.3.2.5 Filosofia de Controlo do Moinho AG

Mudanças na composição do minério (dureza e/ou calibre das partículas) na alimentação do moinho, têm um grande impacto na eficiência da moagem autógena. A composição do minério tem impacto direto na capacidade de processamento e também no calibre do produto da moagem.

Controlar a carga do moinho é essencial para estabilizar o caudal e calibre do produto da moagem. A carga do moinho pode, dentro de alguns limites, ser maioritariamente controlada através da velocidade de rotação do moinho ou então através do caudal de alimentação. A adição de água no moinho e a carga circulante (*underflow* dos ciclones) também influenciam significativamente a carga do moinho.

1. Controlo da carga do moinho através da variação de velocidade de rotação.
 - a) Taxa de alimentação em modo de operação manual (auto);
 - b) A carga do moinho é controlada variando automaticamente a velocidade de rotação do moinho;
 - i. Set-point manual da carga do moinho;
 - ii. O set-point da carga do moinho deverá ser ajustado de modo a obter o calibre desejado no *overflow* dos ciclones primários ou o consumo específico de energia desejado (kWh/t);
 - c) Se por algum motivo o processo de moagem estiver instável:
 - i. Um intervalo de operação para a velocidade pode ser definido através de um valor máximo e mínimo (*OutHigh* e *OutLow*);
 - d) Ciclo de controlo de alimentação ao moinho ativado de modo a reduzir a alimentação fresca se a carga ou o torque no motor estiverem perto de atingir os seus valores máximos, ver ponto 3 abaixo.

2. Controlo de carga do moinho através da variação da taxa de alimentação;
 - a) Taxa de alimentação em modo de operação automático;
 - b) Velocidade de rotação do moinho em modo manual;
 - c) Set-point manual da carga do moinho;
 - i. A carga é controlada mudando a taxa de alimentação;
 - ii. Os set-points da velocidade de rotação e da carga do moinho serão ajustados de modo a obter o calibre de partículas desejado no *overflow* dos ciclones primários ou o consumo específico de energia de moagem (kWh/t).
 - d) Ciclo de controlo de alimentação ao moinho ativado de modo a reduzir a alimentação fresca se a carga ou o torque no motor estiverem perto de atingir os seus valores máximos, ver ponto 3 abaixo.

3. Ciclo de controlo de alimentação ao moinho ativado de modo a reduzir a alimentação fresca se a carga ou o torque do motor estiverem perto de atingir os seus valores máximos;
 - a) Set-point de limite de torque para proteção do equipamento, normalmente não é alterado;

- b) Set-point de torque Máx/Alto, pode ser mudado pelo operador;
 - c) Set-point de limite de carga para proteção do equipamento, normalmente não é alterado;
 - d) Set-point de carga Máx/Alta, pode ser mudado pelo operador;
 - e) Seletor de lógica para valor Min. para a carga e torque de modo a fornecer set-point externo ao controlo de alimentação do moinho.
4. Controlo de torque, o objetivo é controlar o torque através da variação da alimentação (na teoria controlo da potência, mas através do set-point do torque);
- a) Set-point de torque definido pelo operador;
 - b) Taxa de alimentação em modo de operação automático;
 - c) Velocidade de rotação do moinho em modo manual.
5. Taxa de alimentação e velocidade de rotação do moinho em modo de operação automático;
- a) A taxa de alimentação e a velocidade de rotação do moinho variam dependendo dos limites estabelecidos;
 - i. Valor limite máximo para o torque é definido, ver 3a;
 - ii. Valor limite máximo para a carga do moinho é definido. Ver 3c;
 - iii. Um intervalo operacional para a carga é definido com um valor máximo e mínimo;
 - iv. Um set-point máximo é definido para o torque do motor e para a carga do moinho respetivamente;
 - v. O moinho aumentará e operará na sua velocidade máxima quando o torque ou a carga estão a limitar a taxa de alimentação;
 - vi. O moinho operará com velocidade variável de modo a controlar a carga quando a alimentação atinge o seu valor máximo.

3.3.3 Hidrociclones

Hidrociclones são equipamentos de classificação granulométrica.

A classificação é um processo de separação de partículas por calibre, com base na sua velocidade terminal, e sedimentação perturbada, ou seja, na velocidade com que as partículas sedimentam no seio de um meio fluido.

Os hidrociclones utilizam a força centrífuga para acelerar a taxa de sedimentação das partículas. Embora o objetivo dos hidrociclones seja separar as partículas por calibres, outros fatores como a densidade e a forma das partículas também afetam a taxa de sedimentação das mesmas e por conseguinte o desempenho dos hidrociclones.

Um hidrocilcones é um equipamento constituído por uma secção cilíndrica acoplada a uma secção cónica que possui, no seu vértice, uma abertura denominada APEX, por onde é descarregado o *underflow* ou espessado (material mais grosseiro). A alimentação é introduzida tangencialmente à

secção cilíndrica onde existe um tubo coaxial denominado Captador (*Vortex Finder*), por onde é descarregado o *overflow* ou transbordo (material fino) (Figura 28).



FIGURA 28: CICLONE PRIMÁRIO DESMONTADO

hidrociclones são equipamentos que normalmente funcionam em conjunto com outros hidrociclones e não individualmente, as chamadas baterias de hidrociclones. O diâmetro da sua secção cilíndrica dos hidrociclones é ditado pelo calibre ou diâmetro de corte (d_{50}). A capacidade de classificação de um hidrociclone é, por sua vez, determinada pelo diâmetro e pressão de injeção da polpa de alimentação. O caudal total de alimentação da operação de classificação sendo, em geral muito superior à capacidade de um hidrociclone, determina o número de hidrociclones a instalar num arranjo usualmente radial. O número total de hidrociclones inclui ciclones em stand-by, de modo que possam funcionar como reserva em caso de avaria, mas também de modo a haver disponibilidade em caso de necessidade de colocar outro equipamento em funcionamento.(Figura 29).



FIGURA 29: BATERIA DE CICLONES PRIMÁRIOS

As características técnicas dos ciclones primários e secundários utilizados no novo circuito de moagem do PEZ, podem ser encontradas na Tabela 8.

TABELA 8: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS CICLONES PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS

Modelo	Ciclones Primários		Ciclones Secundários	
	gMax20-20-S3178		gMAX20-S3140	
	Nominal	Desenho	Nominal	Desenho
% Sólidos Alimentação	64.47	60.81	58.60	62.07
% Sólidos no <i>Overflow</i>	49.00	40.00	40.00	40.00
% Sólidos no <i>Underflow</i>	78.00	75.00	72.00	72.00
F80 Alimentação (μm)	260	-	88	90
P80 Overflow (μm)	77	75	53	-
Modo Funcionamento (Vertical/Inclinado)	Inclinado		Vertical	
d50 (μm)	89.7		100.1	
Dimensão Vortex Finder (mm)	209.55		209.55	
Dimensão Recomendada Apex (mm)	114.3		120.65	
Pressão Alimentação (KPa)	149.3-156.3		163.3-169.3	
Dimensão Alimentação (mm)	200		200	
Dimensão Overflow (mm)	250		250	
Comprimento Total (mm)	2263		3021	

3.3.4 Vertimill

Vertimill ou moinho Vertical, é um tipo de moinho de carga agitada utilizado em Neves-Corvo. Em Neves-Corvo, estes moinhos assumem a função de moagem secundária e remoagem de zinco na configuração atual da Lavaria do Zinco.

Na configuração estudada neste caso de estudo, um Vertimill é utilizado como moagem secundária em combinação com um moinho AG.

Os Vertimill são frequentemente utilizados devido às diversas vantagens que apresentam comparativamente a outros moinhos. Essas vantagens vão desde baixos custos operacionais, menor espaço utilizado para a sua instalação, menos manutenção e ainda um baixo consumo de forras e carga moente.

O princípio de funcionamento de um Vertimill, baseia-se numa hélice suspensa desde o motor, que quando colocada em rotação agita a polpa no interior do moinho, origina os mecanismos de moagem, responsáveis pela diminuição de calibre das partículas.

Na Figura 30 é possível observar um dos dois Vertimill instalados em Neves-Corvo, que apresenta as seguintes dimensões 13.46 m x 4.09 m x 4.52 m (A x L x P) e conta com uma Potência de 932 kW.



FIGURA 30: VERTIMILL INSTALADO EM NEVES-CORVO

3.3.5 Balanço de Massa Lavaria do Zinco – Fase 1B PEZ

De modo a melhor ilustrar a Fase 1B do PEZ e caracterizá-la em termos de Balanços de Massa, na Figura 31 é possível observar todos os fluxos de entrada e de saída da Lavaria do Zinco. Os fluxos representados correspondem às entradas de minério (t/h), água (tanto água de selagem como água industrial) (m³/h), polpa (m³/h) e ainda à saída de polpa e concentrados.

KEY

SOLIDS T/H	SOLIDS S.G.	SOLIDS MS/H
SOL'N T/H	SOLIDS %	SOL'N MS/H
SLURRY T/H	SLURRY S.G.	SLURRY MS/H

SOL'N MS/H

CC = 500

PHASE 1B - MASS BALANCE - JUNE 2019

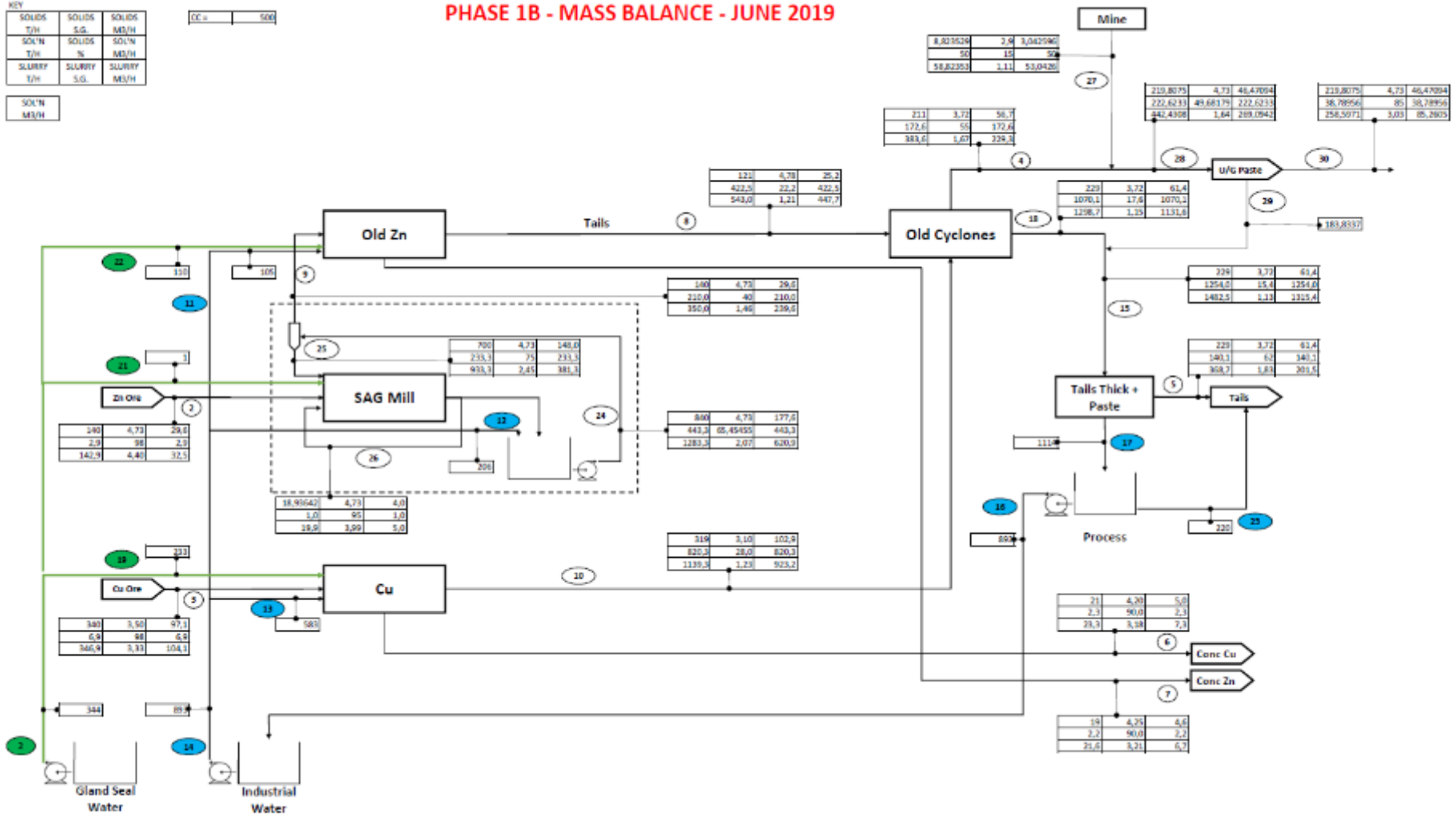


FIGURA 31: FLUXOGRAMA LAVARIA DO ZN FASE 1B COM BALANÇO DE MASSAS. FONTE: (SOMINCOR, 2019)

4. Metodologia

Neste capítulo, serão apresentadas as várias metodologias utilizadas para a obtenção de dados utilizados na elaboração deste trabalho.

Os dados utilizados foram obtidos tanto de forma automática, através da utilização de instrumentação, como de forma manual, recorrendo a amostragens.

4.1 Recolha de Dados Automática – Instrumentação

A recolha de dados feita automaticamente através de instrumentação é um dos mecanismos de controlo mais eficazes numa instalação industrial. Ter dados disponíveis continuamente, permite um controlo mais eficiente e regular do que permitiria a recolha de dados obtidos através de amostragens manuais. Não só a frequência de amostragem seria muito inferior, devido à disponibilidade dos operadores que a realizam, como o tempo necessário para a obtenção dos dados seria também ele muito superior.

Na Figura 32 é possível observar os parâmetros medidos de forma automática através de instrumentação instalada no local.

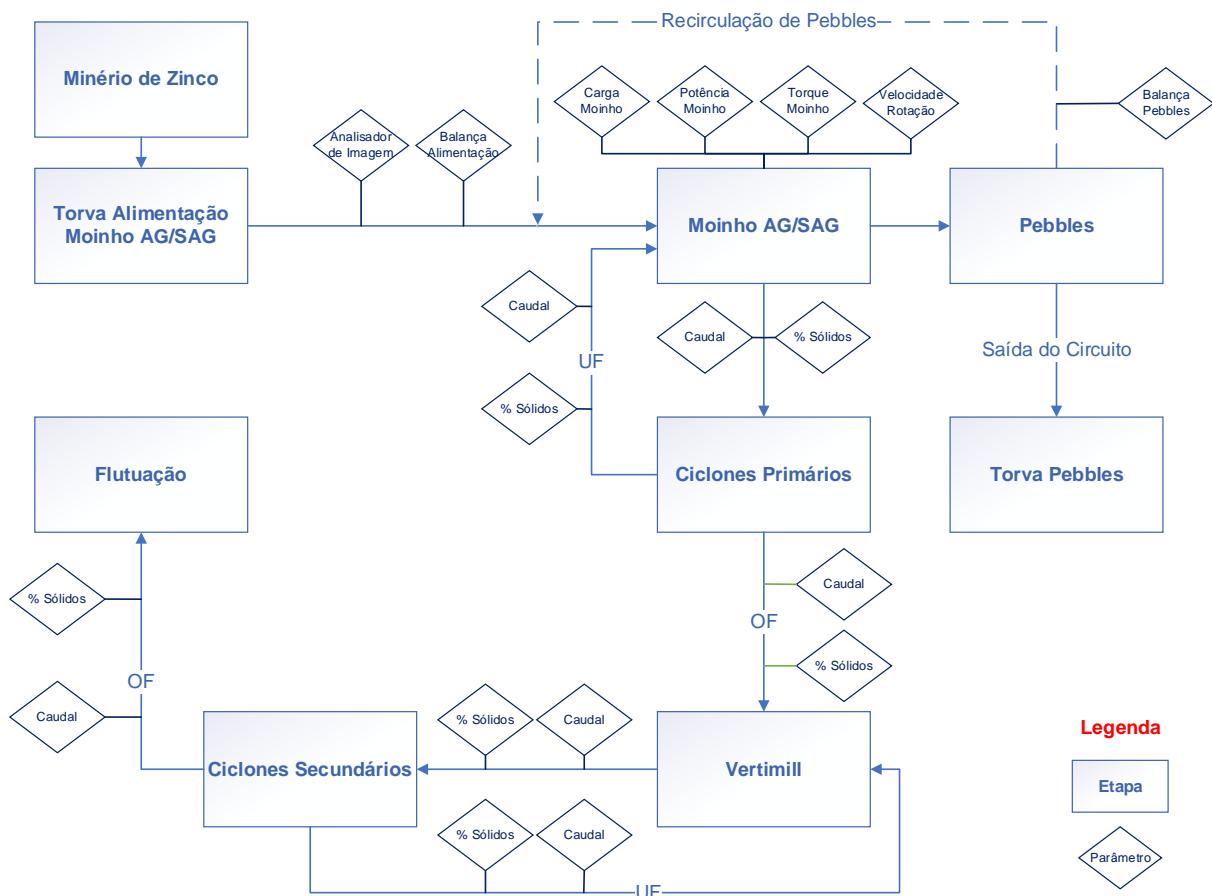


FIGURA 32: DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO DE MOAGEM COM PONTOS DE MEDIÇÃO DE PARÂMETROS REALIZADOS POR INSTRUMENTAÇÃO

4.1.1 Caudalímetros (electromagnéticos)

Caudalímetros são os equipamentos responsáveis por medir caudais de fluidos e de polpas. Os caudalímetros podem ser usados com fluidos condutores comuns, mas também podem ser utilizados com outros fluidos condutores de diferentes características.

Um caudalímetro, ou usando uma terminologia mais rigorosa, um sistema de caudalímetro, é composto por dois equipamentos: o caudalímetro e um transmissor (Figura 33).

Os transmissores utilizam uma técnica de corrente direta pulsada para energizar as bobinas produtoras de fluxo do caudalímetro. Conforme o fluido passa através do campo magnético no caudalímetro, impulsos de baixa voltagem desenvolvem-se através de um par de elétrodos de acordo com a Lei de Faraday. O nível de voltagem desses impulsos é diretamente proporcional à velocidade média do fluido. Os transmissores convertem o impulso de voltagem para um sinal de impulso de saída standard de 4 a 20 mA. O sinal de 4 a 20 mA é utilizado com um recetor indicado, de modo a indicar, gravar e/ou controlar a variável.



FIGURA 33: CONJUNTO CAUDALÍMETRO E TRANSMISSOR. FONTE: (FOXBORO, 2010)

4.1.2 Densímetros

Densímetros são os equipamentos responsáveis por fazer a medição da densidade de um fluxo. Os densímetros, assim como os caudalímetros não são apenas constituídos por um equipamento único, mas sim por um conjunto de equipamentos. Os equipamentos necessários para que um densímetro possa funcionar corretamente são: Portador de Fonte Radioativa (local onde a fonte radioativa é instalada), detetor de cintilação (equipamento que utiliza um cristal sólido, que quando exposto à

radiação, emite impulsos de luz. Estes impulsos de luz são amplificados e convertidos para impulsos elétricos através da utilização de um Tubo Multiplicador de Luz) e um Microprocessador (Figura 34).

O princípio de funcionamento de um densímetro nuclear baseia-se na medição da quantidade de radiação da fonte, que atravessa a tubagem e chega ao recetor. A diferença entre a radiação emitida pela fonte, comparada com a radiação recebida pelo recetor é utilizada para inferir a densidade do fluido. A densidade do fluido pode depois ser convertida para uma percentagem de sólidos, parâmetro que é normalmente medido e consultado pelos operadores.

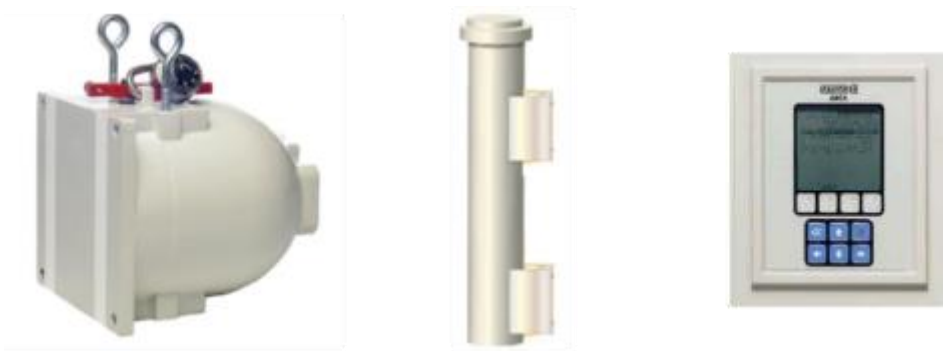


FIGURA 34: A) PORTADOR DE FONTE RADIOATIVA, B) DETETOR DE CINTILAÇÃO, C) MICROPROCESSADOR

4.1.3 Balanças

Balanças são equipamentos que permitem medir a massa de determinado material. Essa medição pode ser uma medição instantânea em determinado momento do tempo, mas pode também ser uma medição de um fluxo de material expresso em unidades de massa por unidade de tempo.

As balanças utilizadas no novo sistema de transporte de minério do PEZ são constituídas por vários componentes. Uma estrutura de carga (Figura 35) que combinada com um Integrador e um sensor de velocidade, permite aferir com exatidão a quantidade de material que está a ser transportada num tapete.

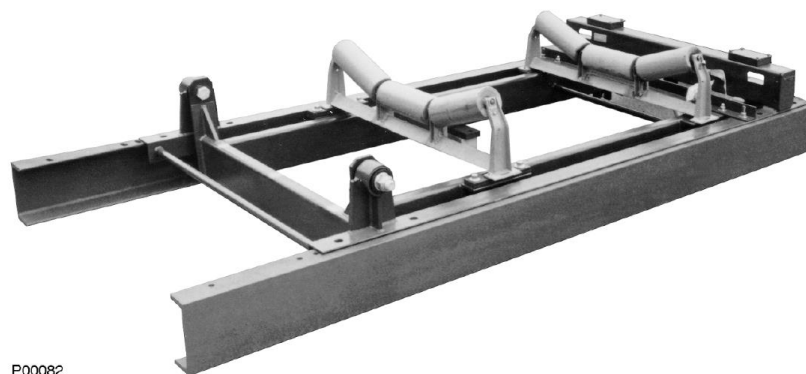


FIGURA 35: ESTRUTURA DE CARGA DA BALANÇA. FONTE: (THERMO FISHER SCIENTIFIC, 2013)

4.1.4 Analisador Granulométrico de Partículas

Um analisador de partículas é constituído por uma câmara que faz a filmagem do material que circula nos tapetes transportadores, por luzes de iluminação e por um software de análise de imagem, que analisa as imagens obtidas dividindo as partículas por classes de calibre e traça a curva de distribuição granulométrica do material (Figura 36). Neste trabalho não foram considerados os resultados deste tipo de instrumentação, uma vez que houve problemas com a calibração do equipamento.

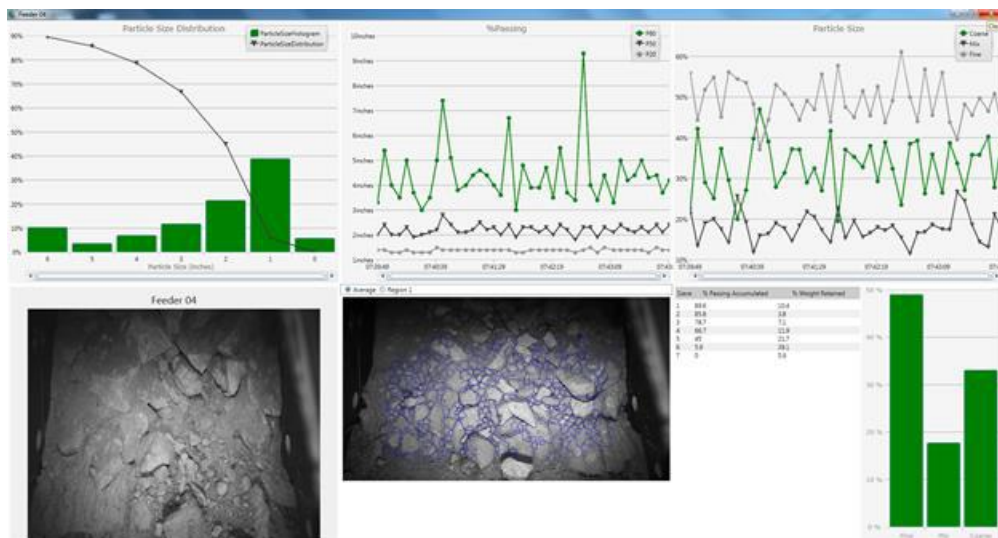


FIGURA 36: IMAGEM DO ECRÃ DE OPERAÇÃO DO ANALISADOR DE PARTÍCULAS. FONTE: (WOODGROVE TECHNOLOGIES INC., 2017)

4.1.5 Transmissores de Pressão dos Descansos

Os transmissores de pressão dos descansos, são os equipamentos responsáveis por medir a pressão nos descansos do moinho. Quando o moinho está carregado, a temperatura dos descansos é mantida constante (43°C) e a mudança na pressão do óleo dos descansos é linear com a carga do moinho. De modo a ser possível fazer esta relação, o moinho foi cheio com água (quantidade conhecida) e foi registada a pressão do óleo nos descansos. Para fazer a conversão da pressão do óleo dos descansos para uma carga foi necessário calcular um fator de cálculo e a carga do moinho utilizando esse fator de cálculo.

- Fator de Cálculo = Carga Conhecida do Moinho/ (Pressão Medida dos Descansos-Pressão Base)
- Carga do Moinho = Fator de Cálculo x (Pressão Medida Média – Pressão Base)

A pressão do óleo está diretamente relacionada com a sua temperatura, é por isso necessário manter a temperatura do óleo dentro dos parâmetros operacionais normais, de modo a evitar leituras erradas da carga interior do moinho.

4.1.6 Sistema PI

O sistema PI, é um software que permite a recolha, armazenamento e manipulação de dados obtidos diretamente da instrumentação instalada numa lavaria ou qualquer outra instalação industrial.

Os dados recolhidos são armazenados num arquivo (Arquivo de Dados PI), que organiza os dados das diversas fontes. Os dados ficam disponíveis neste arquivo e podem ser consultados, analisados e tratados a qualquer altura.

No desenvolvimento desta dissertação, um complemento do Sistema PI, o PI DataLink foi utilizado para a obtenção dos dados necessários. O PI DataLink é um suplemento para Excel que permite recuperar informações do Sistema PI diretamente para uma folha de Excel. Uma vez que é utilizado juntamente com as competências do Excel, permite a realização e análise dos dados obtidos facilmente.

A Figura 37 ilustra o processo de recolha e disponibilização de informação através do Sistema PI.

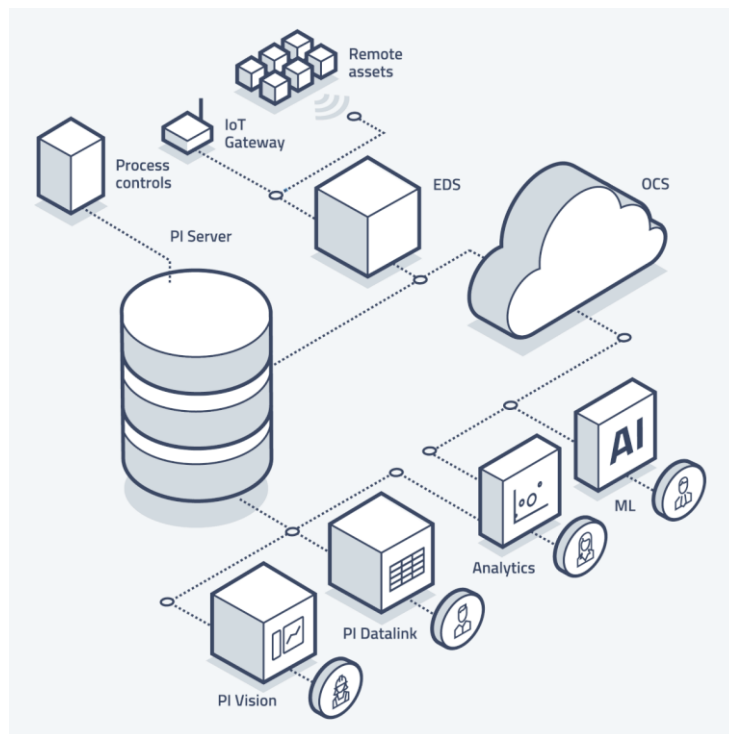


FIGURA 37: PROCESSO DE RECOLHA E DISPONIBILIZAÇÃO DE DADOS ATRAVÉS DO SISTEMA PI. FONTE: (OSISOFT, 2020)

4.2 Recolha de Dados Manual

4.2.1 Amostragem

Durante o arranque do moinho AG/SAG e uma vez que nem toda a instrumentação se encontrava instalada ou calibrada, alguns parâmetros operacionais tiveram de ser medidos manualmente. De modo a obter os dados para fazer esse controlo, foi necessário fazer a recolha de amostras manualmente.

As amostras que tiveram de ser recolhidas manualmente foram: Amostra do *Overflow* dos Ciclones tanto primários como secundários e ainda uma amostra da alimentação do moinho AG/SAG. Estas amostras foram realizadas por operadores em alturas específicas e registadas, utilizando baleses e cortadores (Figura 38). Tanto para a amostragem dos ciclones como para a amostragem à alimentação do moinho (apenas foi realizada uma amostra), estas tiveram de ser processadas em laboratório, pois o seu objetivo era obter a curva de distribuição granulométrica para daí ser possível obter o valor D80.



FIGURA 38: CORTADOR E BALDE PARA AMOSTRAGEM

4.2.2 Tratamento das Amostras em Laboratório

Antes de se poder fazer uma análise granulométrica das amostras recolhidas, estas têm de ser processadas em laboratório. O procedimento de processamento de amostras para análise granulométrica é o que se descreve de seguida:

- i. Colheita da amostra
- ii. Pesagem e efetuar a secagem da amostra em estufa
- iii. Dividir a amostra depois de seca
- iv. Crivagem a húmido
- v. Filtração do infra e supra crivo separadamente

- vi. Secagem em estufa
- vii. Crivagem a seco do supra no vibrador de crivos
- viii. Pesagem dos diversos calibres retidos nos diversos crivos
- ix. Inserção dos dados em computador para obtenção da curva de distribuição granulométrica

Nota: para calibres mais finos é utilizado um granulômetro laser (Malvern) (Figura 39), que faz a análise da amostra (cerca de 2 gramas) e fornece a curva de distribuição granulométrica.



FIGURA 39: GRANULÔMETRO LASER

5. Resultados e Discussão

Uma vez concluída a recolha dos dados dos parâmetros a serem estudados, neste capítulo far-se-á uma análise e tecer-se-ão comentários acerca dos mesmos.

Os dados recolhidos para o desenvolvimento deste trabalho, compreendem o período de funcionamento do moinho AG/SAG durante a fase 1B do PEZ. O período de funcionamento encontra-se compreendido entre o dia 14 de janeiro e o dia 25 de março. Uma vez que o período de funcionamento do moinho não foi contínuo neste intervalo de datas, tendo apenas trabalhado cerca de 8 dias completos, são esses dias de funcionamento completos que serão considerados para a realização deste trabalho. Outra consideração tida para a análise e discussão de resultados, foi a decisão de realizar apenas a análise dos dados referentes aos dias trabalhados no mês de janeiro uma vez que inclui o maior número de dias, cerca de 5.

Os parâmetros analisados nesta dissertação são os seguintes:

- Corrente do Moinho AG/SAG (A);
- Potência Moinho AG/SAG (kW);
- Velocidade de Rotação do Moinho AG/SAG (% velocidade crítica);
- Caudal de Água de Diluição da Caleira de Alimentação (m^3/h);
- Caudal de Água dos Chuveiros do *Trommel* (m^3/h);
- Caudal de Água de Diluição do UF dos Ciclones Primários (m^3/h);
- Caudal de Alimentação dos Ciclones Primários (m^3/h);
- Percentagem de Sólidos da Alimentação dos Ciclones Primários (%);
- Consumo Específico de Energia do Moinho AG/SAG (kWh/t);
- Caudal de Alimentação Fresca do Moinho AG/SAG (t/h);
- Recirculação de *Pebbles* (t/h);
- Carga Interior do Moinho AG/SAG (t);
- Torque do Moinho AG/SAG (N.m);
- D80 Ciclones Primários (μm);
- D80 Alimentação Moinho AG/SAG (μm).

Deste conjunto de parâmetros para os quais foram recolhidos dados, apenas alguns serão utilizados, uma vez que fazer uma análise exaustiva de todos tornaria este trabalho demasiado extenso.

De modo a melhor organizar os parâmetros analisados, os mesmos foram divididos em 3 categorias: variáveis manipuláveis, variáveis controláveis e ainda variáveis monitorizáveis.

É ainda importante salientar que os dados recolhidos, foram recolhidos durante a fase de comissionamento e arranque do moinho AG/SAG, ou seja, muita da instrumentação ainda estava em fase de calibração, outra ainda não estava operacional e o circuito não atingiu a estabilidade.

O presente capítulo será organizado da seguinte forma: em primeiro lugar serão apresentadas e analisadas séries temporais para alguns parâmetros seleccionados, em segundo lugar serão apresentadas e analisadas regressões entre duas variáveis para alguns dos parâmetros analisados e finalmente serão apresentadas e analisadas regressões múltiplas para alguns parâmetros seleccionados.

De modo a perceber melhor os fluxos de entrada e saída do moinho AG/SAG, objeto principal de estudo deste trabalho, apresenta-se a Figura 40.

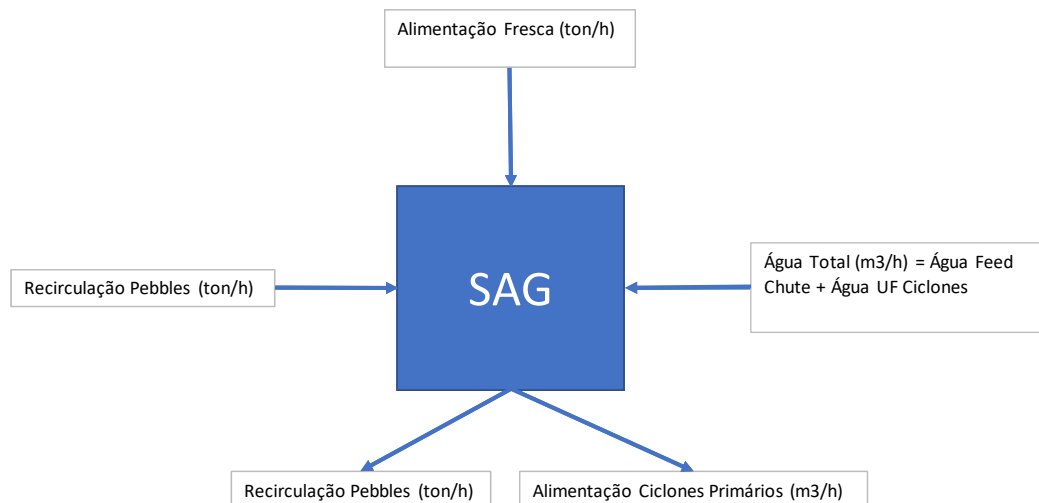


FIGURA 40: ESQUEMA DOS FLUXOS DE ENTRADA E DE SAÍDA DO MOINHO AG/SAG

5.1 Apresentação dados recolhidos

5.1.1 Dados obtidos através de instrumentação

Os dados obtidos diretamente através de instrumentação são apresentados na forma da Tabela 11 na seção de anexos devido à sua dimensão.

5.1.2 Dados obtidos através de amostragem

5.1.2.1 Amostragem da Alimentação do Moinho AG/SAG

Na Tabela 9 e

Tabela 10 são apresentados os resultados da amostragem da alimentação do moinho AG/SAG. Como complemento é ainda apresentada a curva de distribuição granulométrica da amostra da alimentação do moinho AG/SAG na Figura 41.

TABELA 9: DISTRIBUIÇÃO MÁSSICA (HÚMIDO E SECO) DOS VÁRIOS CALIBRES DA AMOSTRA DE ALIMENTAÇÃO DO MOINHO AG/SAG

	Húm., kg	Sec., kg
Total alimentação	61980	60191
+100mm	2060	2001
-100+25mm	36400	35349
-25mm	23520	22841
-25mm criv. no lab.	41.53	40.33

TABELA 10: DISTRIBUIÇÃO MÁSSICA POR CALIBRES DA AMOSTRA DA ALIMENTAÇÃO DO MOINHO AG/SAG

Primeira Metade				
Calibre mm	Peso Retido (kg)	Peso Retido (%)		Cumulante Passados (%)
		Individual	Cumulante	
400.0	0	0.00	0.00	100.00
100.0	2001	3.32	3.32	96.68
25.0	35349	58.73	62.05	37.95
16.0	1663	2.76	64.81	35.19
11.2	2984	4.96	69.77	30.23
8.0	2746	4.56	74.34	25.66
5.6	2725	4.53	78.86	21.14
2.8	3541	5.88	84.75	15.25
1.4	2399	3.99	88.73	11.27
0.71	1449	2.41	91.14	8.86
0.50	614	1.02	92.16	7.84
0.355	466	0.77	92.93	7.07
0.25	396	0.66	93.59	6.41
0.18	339	0.56	94.15	5.85
0.125	326	0.54	94.70	5.30
0.090	348	0.58	95.27	4.73
0.063	415	0.69	95.96	4.04
0.045	7	0.01	95.98	4.02
-0.045	2422	4.02	100.00	0.00
Total	60191	100.00	-	-
d80 (µm)	76			
d80_(check)	79			

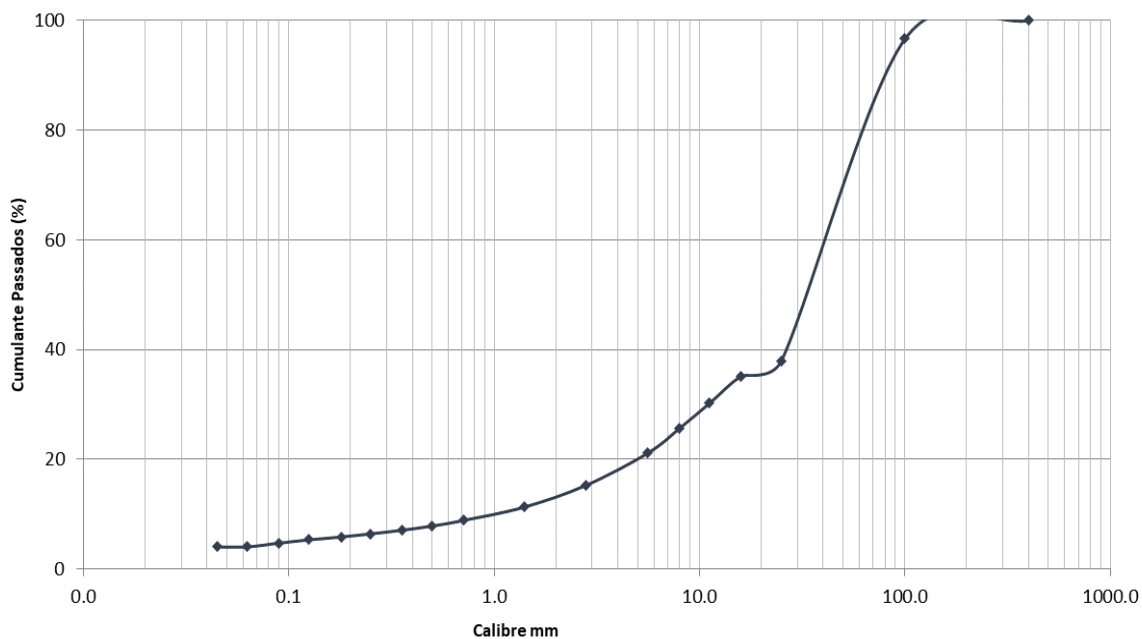


FIGURA 41: CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA DA ALIMENTAÇÃO DO MOINHO AG/SAG

5.1.2.2 Amostragem do *Overflow* dos Ciclones Primários

Na Tabela 12, na secção de anexos são apresentados os valores dos D80 para cada hora de amostragem. Há que ter em atenção que, uma vez que não houve uma amostragem regular, por ser impossível conseguir ter uma amostragem manual com a mesma frequência que os restantes dados obtidos (dados horários) através de instrumentação, alguns dos valores de D80 representados na tabela foram obtidos através de interpolação polinomial cubica. Onde não foi possível realizar interpolação para determinar os valores, aparecerá o código NaN.

5.2 Análise dos dados obtidos

Nesta seção do presente trabalho será feita a análise dos dados obtidos da seguinte forma: em primeiro lugar será apresentado um correlograma das variáveis estudadas, de seguida será feita uma análise às séries temporais de alguns parâmetros complementadas por histogramas, em terceiro lugar uma análise às regressões entre duas variáveis de alguns parâmetros e por último uma análise às regressões múltiplas de alguns parâmetros.

Como referido anteriormente, de modo a fazer uma filtragem dos parâmetros analisados, de modo a não tornar a sua análise muito extensa, os parâmetros foram divididos por categorias:

- Variáveis Manipuláveis: Alimentação Fresca ao Moinho AG/SAG, Velocidade de Rotação do Moinho AG/SAG, Caudal Água Caleira Alimentação Moinho AG/SAG, Caudal Diluição do UF dos Ciclones Primários, Recirculação de Pebbles.

- Variáveis Controláveis: D80 do OF dos Ciclones Primários, % de Sólidos do OF dos Ciclones Primários
- Variáveis Monitorizáveis: Carga Interior do Moinho AG/SAG, Torque do Moinho AG/SAG e Potência do Moinho AG/SAG

O *software* utilizado para fazer a análise dos dados obtidos foi o Minitab. O Minitab é um *software* de análise de dados. Permite fazer a análise estatística de conjunto de dados e permite identificar padrões e tendências. Devido à maior facilidade em analisar dados utilizando este programa, foi-lhe dada preferência relativamente ao Excel.

5.2.1 Matriz de Correlações Lineares das Variáveis Estudadas

A Figura 42, representa a Matriz de Correlações das variáveis estudadas. Este tipo de gráfico é extremamente útil quando se pretendem comparar visualmente vários pares de variáveis de acordo com os seus coeficientes de correlação de Pearson.

As correlações neste tipo de gráfico são representadas através de um código de cores, onde as cores mais escuras correspondem a maiores coeficientes de correlação, quer sejam elas correlações positivas ou negativas.

Correlações positivas (identificadas com cores na gama do vermelho), significam que à medida que uma variável aumenta a outra também aumentará.

Correlações negativas (identificadas com cores na gama do azul), significam que à medida que uma variável aumenta a outra tende a diminuir.

Através da observação da figura é possível observar várias correlações positivas fortes (>0,80), como é o caso da Potência do Motor em Função da Corrente do Motor. É também possível observar que o Torque do Moinho está fortemente associado à Corrente do Moinho, Potência do Motor, Caudal de Água da Caleira de Alimentação e ainda à Carga Interna.

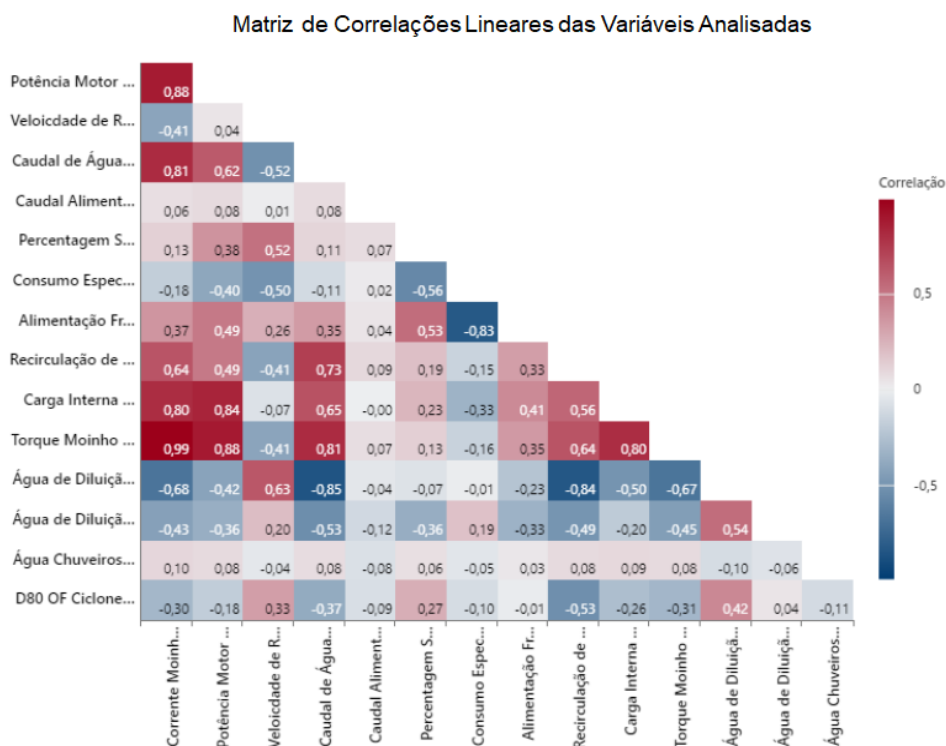


FIGURA 42: MATRIZ DE CORRELAÇÕES LINEARES DAS VARIÁVEIS ANALISADAS (BLOCO TRIANGULAR INFERIOR)

5.2.2 Análise de Séries Temporais (Análise de Tendências)

5.2.2.1 D80 da Alimentação e OF dos Ciclones Primários

Relativamente ao D80 do *Overflow* dos Ciclones Primários, este deve ter como suporte os dados obtidos na amostragem da alimentação do moinho AG/SAG e apresentados no ponto 6.1.2.1.

Observando os dados da curva de distribuição granulométrica da alimentação do moinho AG/SAG, é possível observar que o valor de D80 tem um valor 76 mm, claramente inferior ao D80 considerado no design do moinho AG/SAG que deveria ser da ordem dos 150 mm. Este facto tem uma influência direta e considerável no modo de funcionamento do moinho. Estando o moinho a trabalhar de modo autógeno, seria necessário ter minério de calibre superior, que funcionaria como carga moente. Tendo o minério da alimentação ao moinho um calibre tão baixo, os mecanismos de fragmentação das partículas dentro do moinho, deixam de ser mecanismos de impacto e passam a ser mecanismos de abrasão/fricção originando uma moagem mais fina e consequentemente um D80 do OF dos Ciclones Primários Inferior.

A série temporal do D80 do *Overflow* dos Ciclones Primários (Figura 43), apresenta-se como uma série não constante e com alguns picos no intervalo de tempo entre as 80 e as 110 horas de funcionamento do moinho. É possível observar uma tendência ligeiramente crescente no valor do D80. A análise desta série temporal está condicionada pelo facto de grande parte dos valores que a compõe terem sido obtidos através de uma interpolação polinomial cúbica, devido à falta de dados de amostragem. O valor médio para o D80 situa-se nos 35.19 μm , também ele claramente inferior ao valor de D80 considerado para o OF dos Ciclones Primários, que se deveria situar perto dos 75 μm . Este é claramente um sinal de que os mecanismos de moagem no interior do moinho são mais de abrasão do que de impacto, consequência direta do baixo calibre da alimentação.

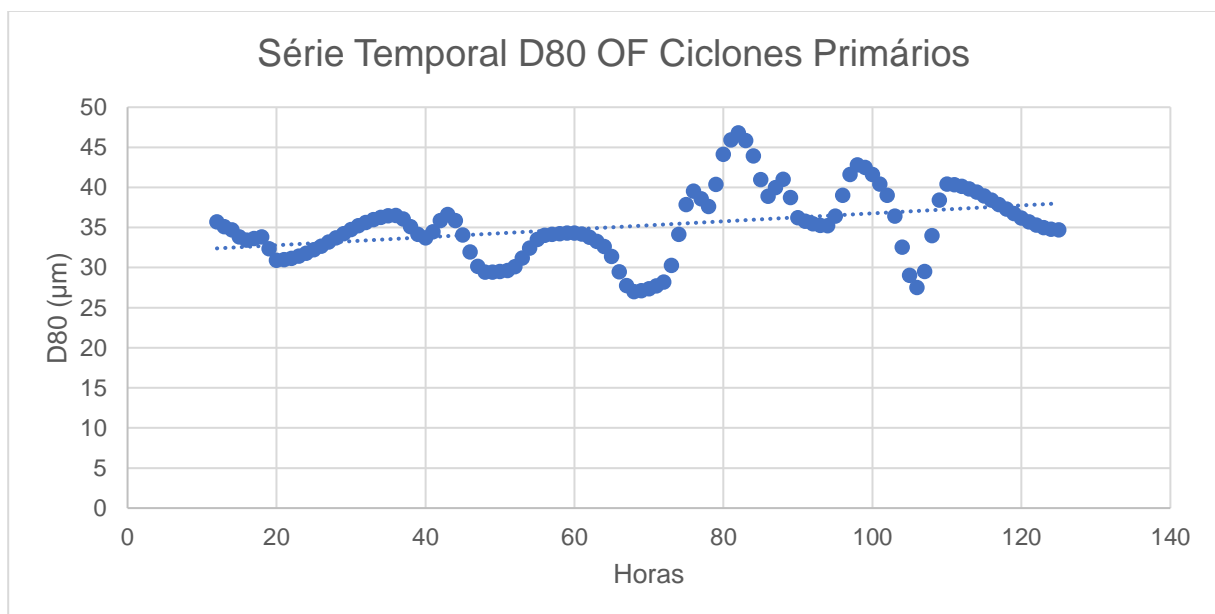


FIGURA 43: SÉRIE TEMPORAL D80 DO OF DOS CICLONES PRIMÁRIOS

5.2.2.2 Alimentação Fresca do Moinho AG/SAG

Na Figura 44 observa-se que a Alimentação Fresca do Moinho AG/SAG teve uma tendência ligeiramente decrescente ao longo do tempo. É também possível observar que ao longo do tempo houve alguns períodos onde a alimentação desceu drasticamente, este facto pode dever-se a possíveis encravamentos no tapete transportador. Apesar de algumas oscilações o Caudal de Alimentação Fresca do Moinho AG/SAG manteve-se relativamente constante ao longo do período de funcionamento considerado. Observando o Histograma da Figura 45, o valor médio do caudal de alimentação situou-se perto das 132.7 t/h, mais ou menos de acordo com a tonelagem planeada de 140 t/h.

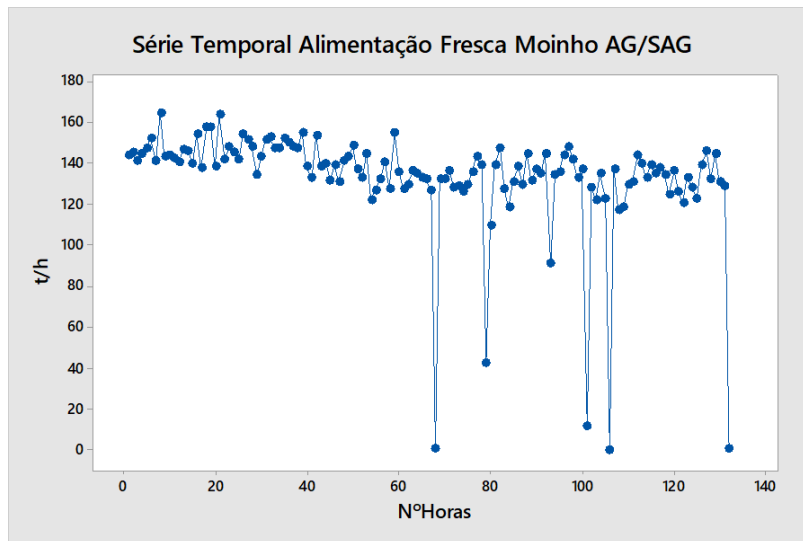


FIGURA 44: SÉRIE TEMPORAL ALIMENTAÇÃO Fresca MOINHO AG/SAG

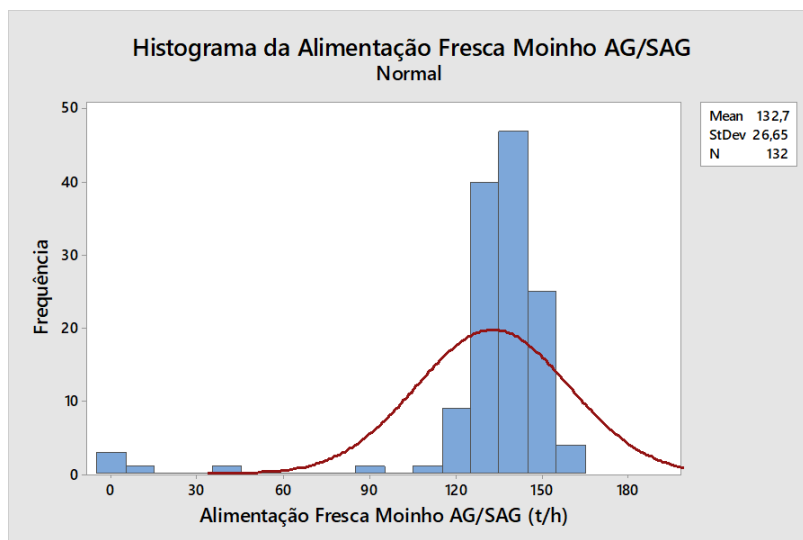


FIGURA 45: HISTOGRAMA ALIMENTAÇÃO Fresca MOINHO AG/SAG

5.2.2.3 Velocidade de Rotação do Moinho AG/SAG

Através da Figura 46 é possível ver que a velocidade de rotação do moinho AG/SAG, expressa em % da velocidade crítica, teve uma tendência de crescimento ao longo do período de funcionamento considerado. É possível observar que a série temporal tem dois valores claramente anômalos, mas que coincidem com a quebra registada na alimentação fresca do moinho como se constatou no ponto anterior. Através do Histograma da Figura 47 é observa-se que o valor médio da velocidade de rotação do moinho se situou perto dos 80 % da velocidade crítica de rotação.

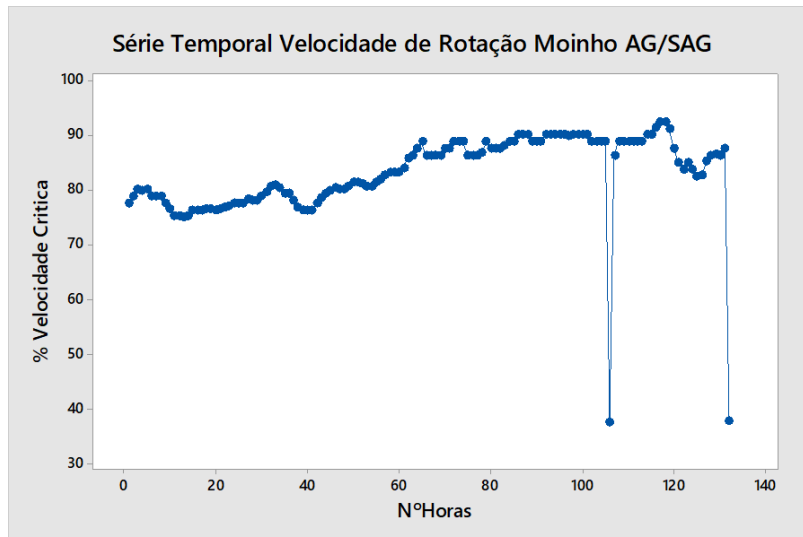


FIGURA 46: SÉRIE TEMPORAL VELOCIDADE DE ROTAÇÃO MOINHO AG/SAG

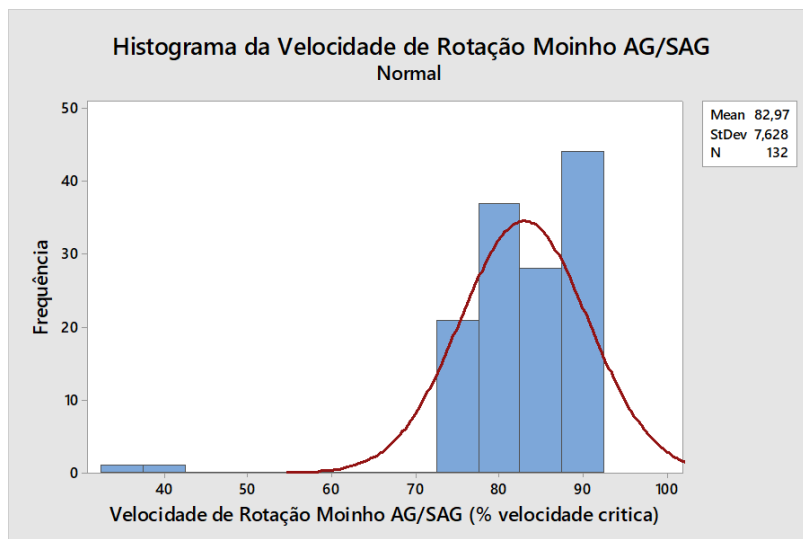


FIGURA 47: HISTOGRAMA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO MOINHO AG/SAG

5.2.2.4 Caudal de Água da Caleira de Alimentação do Moinho AG/SAG

Através da observação da Figura 48, é possível observar dois períodos totalmente distintos na adição de água da caleira do moinho AG/SAG. Um primeiro período onde a adição de água se situou perto

dos 15 m³/h e um segundo período onde a adição de água se situou perto dos 5 m³/h. O histograma da Figura 49, mostra claramente os dois períodos distintos de adição de água.

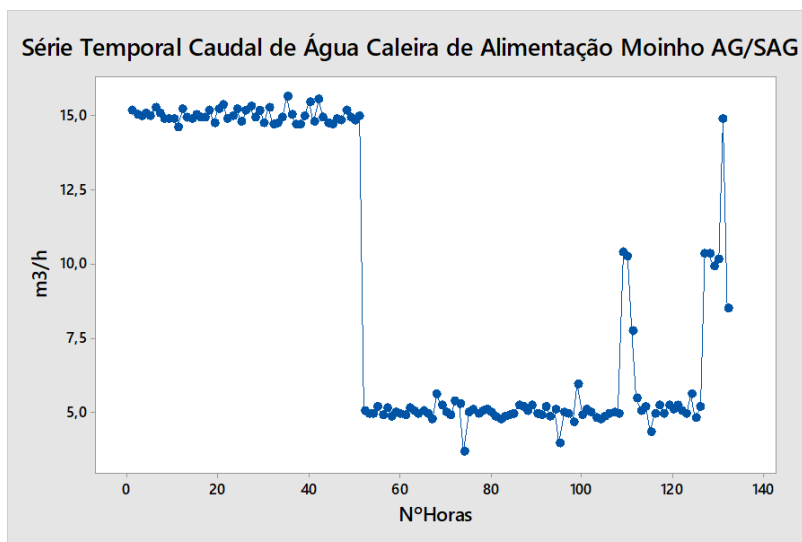


FIGURA 48: SÉRIE TEMPORAL CAUDAL DE ÁGUA CALEIRA DE ALIMENTAÇÃO MOINHO AG/SAG

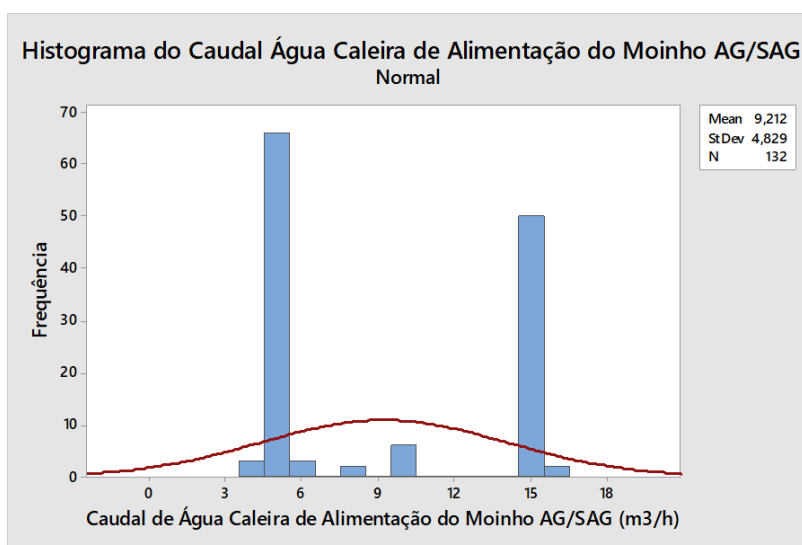


FIGURA 49: HISTOGRAMA DO CAUDAL DE ÁGUA DA CALEIRA DE ALIMENTAÇÃO DO MOINHO AG/SAG

5.2.2.5 Caudal de Água de Diluição do UF dos Ciclones Primários

A série temporal da Figura 50 mostra 3 períodos distintos de adição de água de diluição no *underflow* dos ciclones primários. O primeiro período com um caudal de adição de água na ordem dos 20 m³/h, um segundo período com um caudal de adição de água na ordem dos 25 m³/h e ainda um terceiro período com um caudal de cerca de 30³/h. Estas observações podem ser confirmadas através da Figura 51, onde as maiores frequências são os 20, 25 e 30 m³/h.

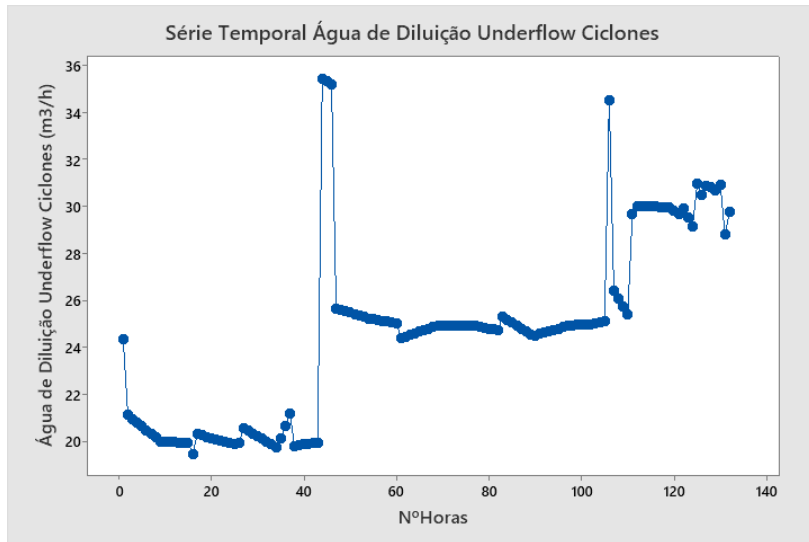


FIGURA 50: SÉRIE TEMPORAL ÁGUA DILUIÇÃO UF CICLONES

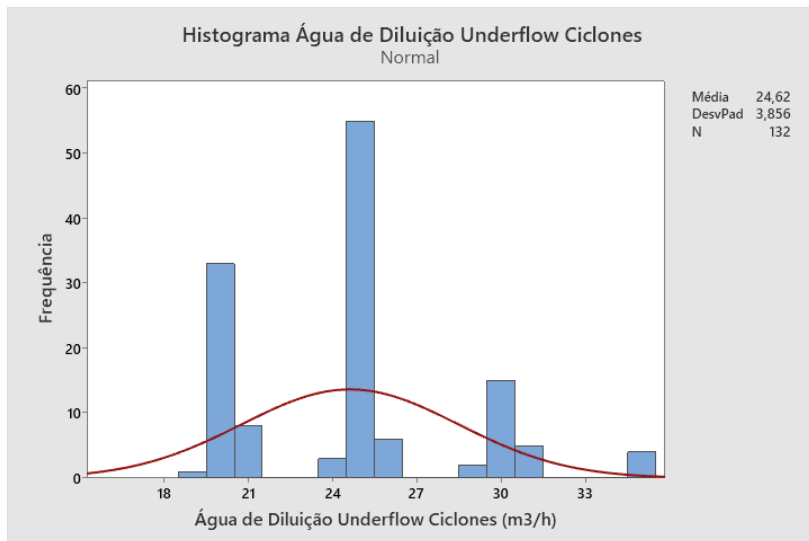


FIGURA 51: HISTOGRAMA ÁGUA DILUIÇÃO UNDERFLOW CICLONES

5.2.2.6 Caudal de Água Diluição Tanque de Descarga Moinho AG/SAG

Observando a Figura 52, complementada pela Figura 53, verifica-se que o caudal de água de diluição adicionado ao tanque de descarga do moinho AG/SAG (Alimentação aos Ciclones Primários), foi aumentado ao longo do tempo até que atingiu um patamar de estabilidade situado perto dos 150 m³/h

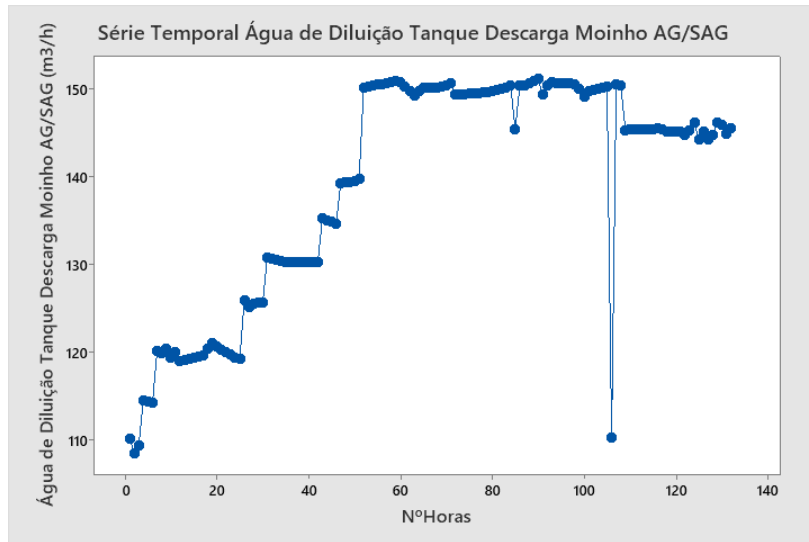


FIGURA 52: SÉRIE TEMPORAL ÁGUA DILUIÇÃO TANQUE DESCARGA MOINHO AG/SAG

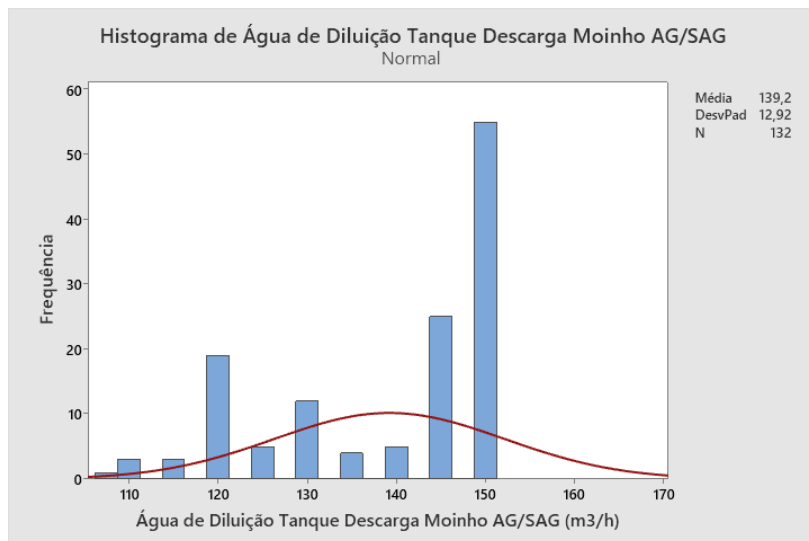


FIGURA 53: HISTOGRAMA ÁGUA DE DILUIÇÃO TANQUE DESCARGA MOINHO AG/SAG

5.2.3 Análise de Regressões entre Dois Parâmetros

A regressão linear, simples e múltipla, é a mais utilizada na prática, pois as relações matemáticas entre variáveis, quando desconhecidas, podem ser aproximadas por modelos polinomiais completos ou incompletos do 1º e 2º grau nas variáveis independentes e suas interações. Os modelos de regressão linear, são modelos lineares nos coeficientes ajustáveis e não nas variáveis independentes ou explicativas. Por exemplo o modelo: $y = C_0 + C_1 \cdot X_1 + C_2 \cdot X_2$ é linear nos coeficientes C_0 , C_1 e C_2 . O modelo $y = C_0 + C_1 \cdot X_1^2 + C_2 \cdot X_2^3$ é também linear nos coeficientes C_0 , C_1 e C_2 , mas não nas variáveis

X_1 e X_2 . A regressão linear trata da estimação/ajustamentos dos coeficientes e validação do modelo ajustado.

Graças às contribuições de muitos investigadores, publicadas em revistas especializadas, são conhecidas algumas relações empíricas ou semi-empíricas entre algumas das principais variáveis listadas nesta dissertação, que são modelos não lineares nos coeficientes ajustáveis. Exemplos disso são: Potência Consumida (P) = $10 \cdot WI \cdot ((1/\sqrt{P_{80}}) - (1/\sqrt{F_{80}})) \cdot F$, onde F é o caudal de sólidos da alimentação do circuito. $P = f(\text{Massa de Material no Moinho, Velocidade de Rotação, etc.})$, onde f é a função semi-empírica, tal como publicada por Hogg e Fuerstenau. (Hogg & Fuerstenau, 1973)

5.2.3.1 Torque vs. Carga Interna do Moinho AG/SAG

A reta de regressão linear simples entre o Torque e a Carga Interna pode ser observada na Figura 54. De acordo com vários artigos da especialidade, o torque deverá aumentar sempre que determinadas condições se verificam: o centro da carga encontra-se mais afastado do centro do moinho, a massa da carga aumenta e a massa aumenta devido ao aumento de densidade do minério.

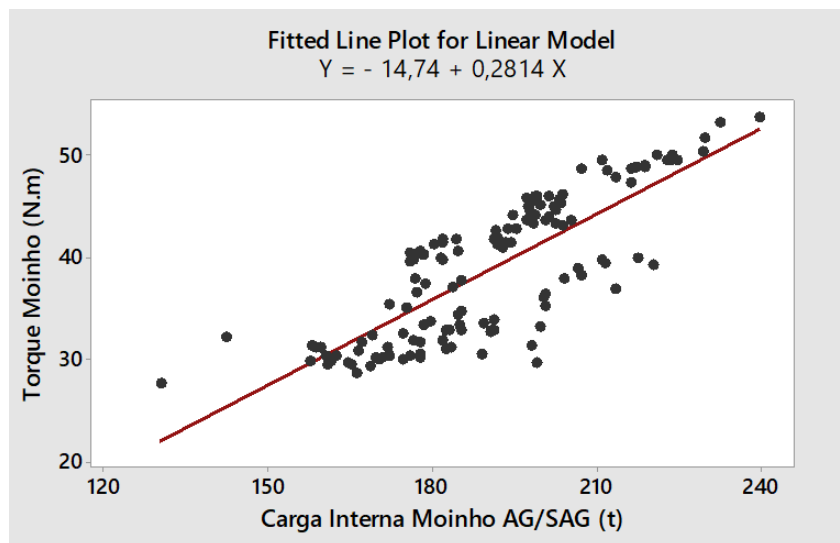


FIGURA 54: REGRESSÃO LINEAR SIMPLES TORQUE VS. CARGA INTERNA

A Figura 55 mostra que existe uma relação estatística muito significativa entre o Torque e a Carga do moinho, com um *valor de p* inferior a 0.05, mais concretamente 0.001.

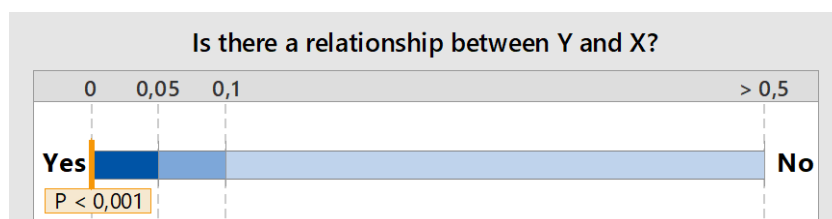


FIGURA 55: SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA DA RELAÇÃO ENTRE O TORQUE E A CARGA DO MOINHO

A Figura 56 mostra que o R^2 do modelo de regressão é igual a 63.96 %, isto quer dizer que 63.96 % da variação do torque no moinho pode ser explicada pela carga interna.

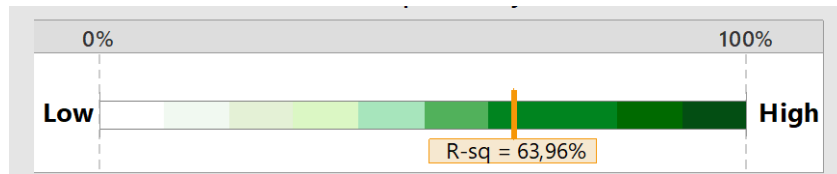


FIGURA 56: % DE VARIAÇÃO EXPLICADA PELO MODELO DE REGRESSÃO

É ainda possível observar através da Figura 57 que existe uma clara correlação linear positiva entre o Torque e a Carga Interna do Moinho ($r=0.80$). Isto significa que quando a carga interna do moinho aumenta, também o torque tende a aumentar.

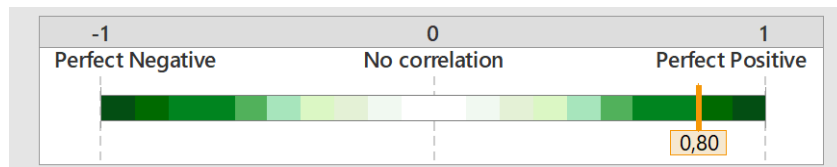


FIGURA 57: CORRELAÇÃO ENTRE O TORQUE E A CARGA DO MOINHO

5.2.3.2 Potência vs. Carga Interna do Moinho AG/SAG

A Figura 58 mostra a curva de regressão entre a Potência e a Carga Interna do Moinho AG/SAG. A curva de regressão é dada pela função quadrática que melhor se ajusta aos valores observados.

Como seria de esperar, à medida que a carga interior do moinho aumenta, também a potência consumida pelo motor do moinho aumenta.

Através do gráfico é possível observar que mesmo para valores de carga interna superiores, ainda há potência disponível no motor do moinho de modo a conseguir lidar com cargas superiores, uma vez que o motor tem uma potência disponível de 8500 kW.

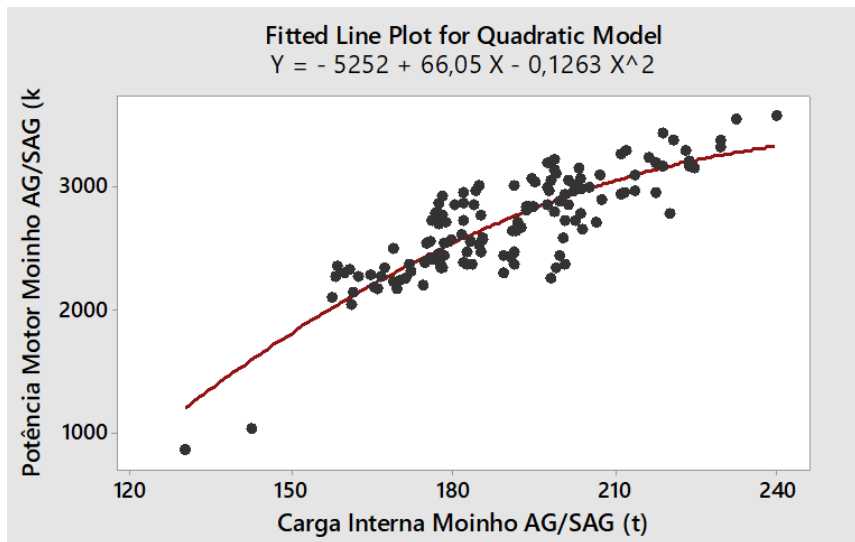


FIGURA 58: CURVA DE REGRESSÃO ENTRE POTÊNCIA E CARGA INTERNA DO MOINHO AG/SAG

A Figura 59 mostra que existe uma clara relação estatística entre a Potência e a Carga Interna do Moinho, com um valor $p < 0.001$.

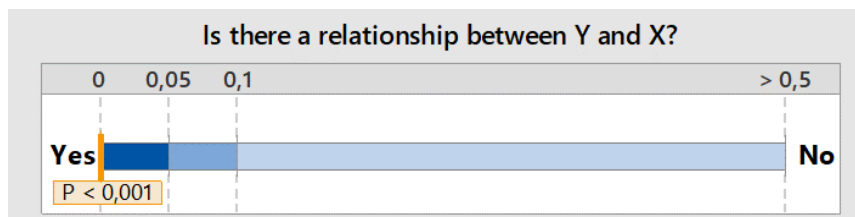


FIGURA 59: SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA DA RELAÇÃO ENTRE A POTÊNCIA E A CARGA INTERNA DO MOINHO AG/SAG

A Figura 60 mostra um R^2 de 73.01 % o que significa que 73.01 % da variação da Potência do moinho, pode ser explicada pelo modelo de regressão.

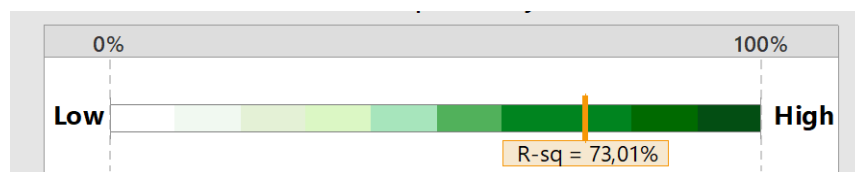


FIGURA 60: % DE VARIAÇÃO EXPLICADA PELO MODELO DE REGRESSÃO

5.2.3.3 D80 do *Overflow* dos Ciclones Primários vs. Consumo Específico de Energia

Observando a Figura 61, constata-se que não existe uma concentração de valores clara. Os dados obtidos para o D80 do *overflow* dos ciclones primários, encontram-se dispersos no gráfico, com o consumo específico de energia a variar entre cerca de 15 kWh/t e valores muito superiores na ordem dos 25 kWh/t.

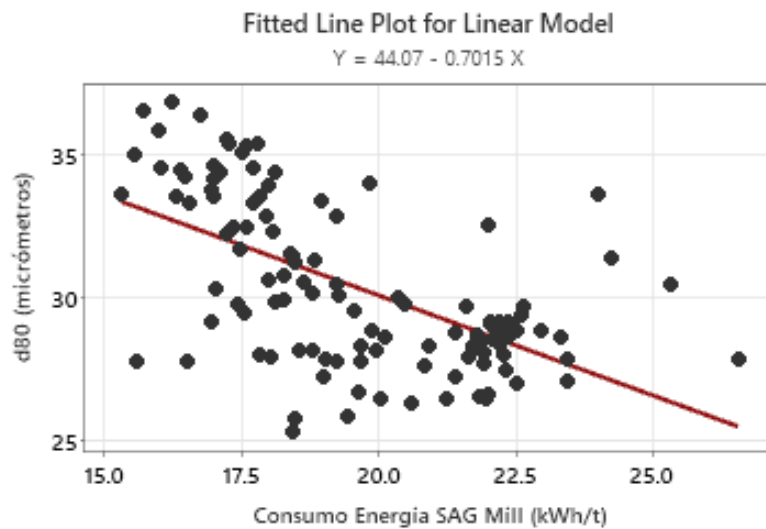


FIGURA 61: CURVA DE REGRESSÃO ENTRE D80 DO OF DOS CICLONES PRIMÁRIOS E CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA

A Figura 62 mostra uma relação estatística significativa entre o D80 dos OF dos Ciclones Primários e o Consumo Específico de Energia. Um *valor p* inferior a 0.001 está claramente acima do valor de 0.05 necessário para haver alguma relação estatística entre estes dois parâmetros.

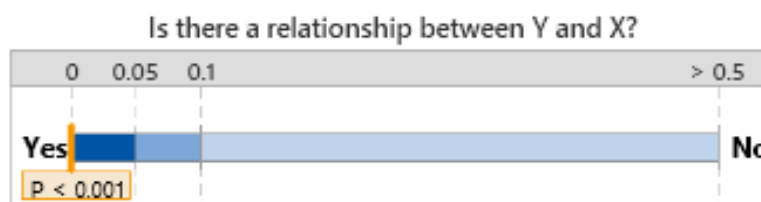


FIGURA 62: SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA DA RELAÇÃO ENTRE O D80 DO OF DOS CICLONES PRIMÁRIOS E CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA

A porcentagem de variação explicada pelo modelo de regressão encontra-se nos 34.09 %. Isto quer dizer que 34.09 % da variação do D80 do OF dos Ciclones Primários pode ser explicado pelo modelo de regressão.

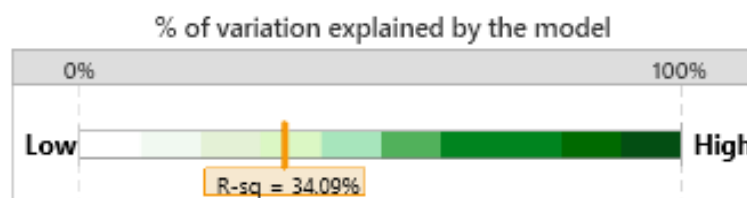


FIGURA 63: % DE VARIAÇÃO EXPLICADA PELO MODELO DE REGRESSÃO

A Figura 64 confirma que existe uma correlação negativa entre o D80 do OF dos Ciclones Primários e o Consumo Específico de Energia. Ou seja, à medida que o D80 do OF dos Ciclones Primários diminui,

o consumo específico de energia aumenta, como seria de esperar, uma vez que para moer mais fino é necessária uma maior quantidade de energia.

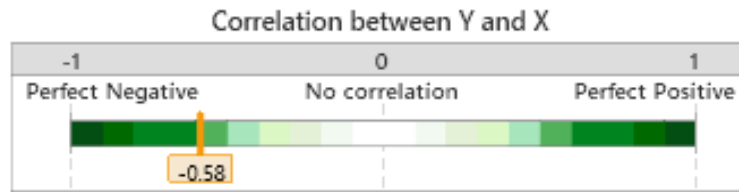


FIGURA 64: CORRELAÇÃO ENTRE O D80 DO OF DOS CICLONES PRIMÁRIOS E O CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA

5.2.4 Análise de Regressões Lineares entre Múltiplos Parâmetros

5.2.4.1 Regressão Linear Múltipla Torque vs. Carga Interna, Recirculação de Pebbles, Caudal de Água da Caleira de Alimentação e Água de Diluição do UF dos Ciclones Primários

A Figura 65, mostra a relação estatística entre o Torque e as restantes variáveis consideradas para o modelo de regressão. Com um valor de $p < 0,001$, existe uma relação estatística significativa entre o Torque e as restantes variáveis utilizadas.

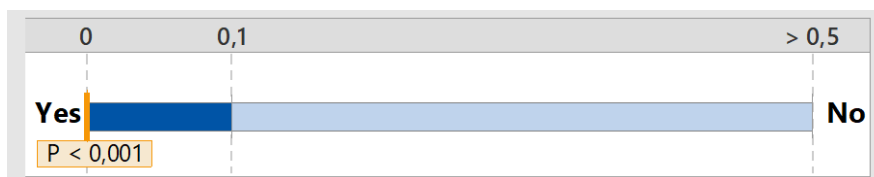


FIGURA 65: SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA DA RELAÇÃO ENTRE O TORQUE E AS OUTRAS VARIÁVEIS

Observando a Figura 66, é possível concluir que uma percentagem elevada (85,99 %) da variação do valor do Torque do moinho pode ser explicada pelo modelo de regressão obtido.

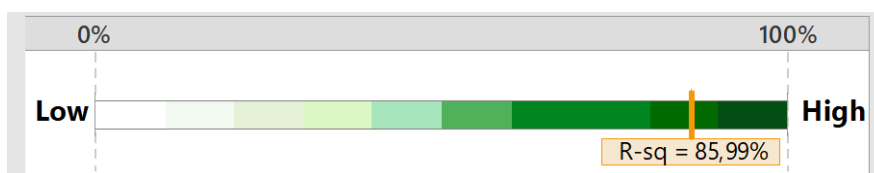


FIGURA 66: % DE VARIAÇÃO EXPLICADA PELO MODELO DE REGRESSÃO

Na Figura 67, é possível observar o impacto individual de cada variável utilizada no valor do torque do moinho. Como se pode ver na figura, a variável que mais influencia o valor do torque do moinho, é a carga interna, algo que pode ser confirmado através da Figura 68, onde a carga do moinho é a maior responsável pelo aumento da percentagem do R^2 .

A regressão múltipla aqui apresentada vem confirmar o que já tinha sido obtido através da regressão simples entre o Torque e a Carga Interna, onde se observou claramente que o aumento da carga interna do moinho influenciava consideravelmente o valor do Torque.

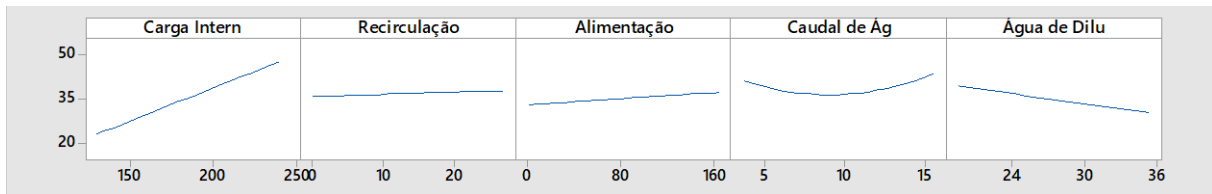


FIGURA 67: INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS DE VARIÁVEIS NO TORQUE DO MOINHO

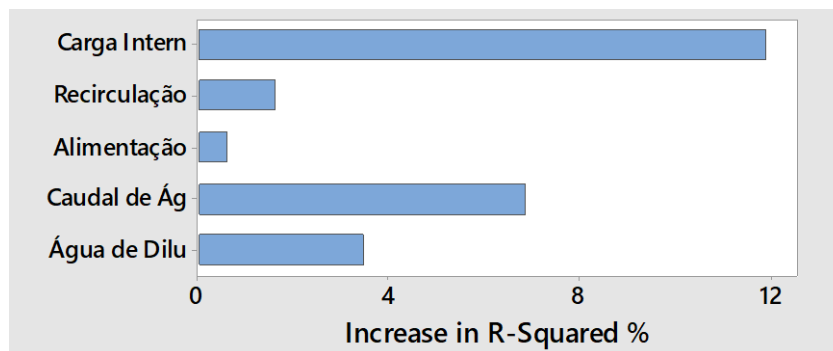


FIGURA 68: IMPACTO INCREMENTAL DAS DIVERSAS VARIÁVEIS

Através deste modelo de regressão múltipla foi possível obter a seguinte equação (1).

$$\begin{aligned} \text{Torque Moinho} = & 90.3 - 0.0276 X1 + 1.925 X2 - 0.4432 X3 - 5.660 X4 - 1.606 X5 \\ & + 0.1609 X4^2 - 0.00974 X1 \times X2 + 0.002466 X1 \times X3 + 0.1122 X4 \times X5 \end{aligned} \quad (1)$$

Sendo:

X1: Carga Interna do Moinho (t)

X2: Recirculação de Pebbles (t/h)

X3: Alimentação Fresca do Moinho (t/h)

X4: Caudal de Água da Caleira de Alimentação do Moinho (m³/h)

X5: Água de Diluição do UF dos Ciclones Primários (m³/h)

5.2.4.2 Regressão Linear Múltipla D80 do OF dos Ciclones Primários vs. Velocidade de Rotação do Moinho, Caudal de Água da Caleira de Alimentação do Moinho, Água de Diluição do Tanque de Descarga do Moinho, Água de Diluição do UF dos Ciclones Primários, Alimentação Fresca Moinho

A Figura 69 mostra a significância estatística entre o D80 do OF dos Ciclones Primários e as restantes variáveis utilizadas para a construção do modelo de regressão linear múltipla. Com um valor de $p < 0.001$

pode dizer-se que o D80 do OF dos Ciclones Primários e as restantes variáveis têm uma relação estatística significativa.

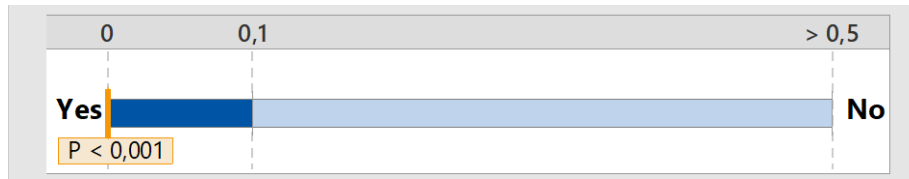


FIGURA 69: SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA DA RELAÇÃO ENTRE O D80 DO OVERFLOW DOS CICLONES PRIMÁRIOS E AS OUTRAS VARIÁVEIS

A Figura 70 mostra a percentagem de variação explicada pelo modelo e representada pelo valor de R^2 , que neste caso específico tem o valor de 59.54 %. Isto significa que 59.54 % da variação do valor do D80 do overflow dos Ciclones Primários pode ser explicado pelo modelo de regressão.

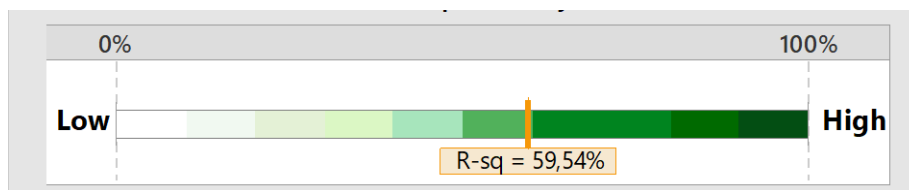


FIGURA 70: % DE VARIAÇÃO EXPLICADA PELO MODELO DE REGRESSÃO

Analisando a Figura 71 e a Figura 72, é possível concluir que das variáveis consideradas para a elaboração deste modelo de regressão múltipla, a que mais influência tem no valor do D80 do OF dos Ciclones Primários é a Água de Diluição da Caixa de Descarga do Moinho AG/SAG. A variável Alimentação Fresca do Moinho AG/SAG, não entrou na construção deste modelo de regressão, devido à sua baixa contribuição para o mesmo.

A variável Água de Diluição da Caixa de Descarga do Moinho AG/SAG contribui para o modelo com a maior percentagem.

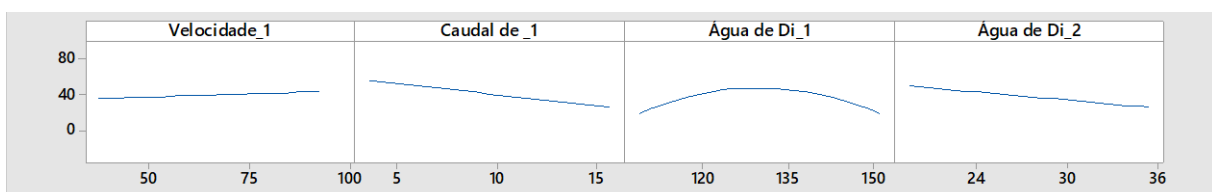


FIGURA 71: INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS DE VARIÁVEIS NO D80 DO OF DOS CICLONES PRIMÁRIOS

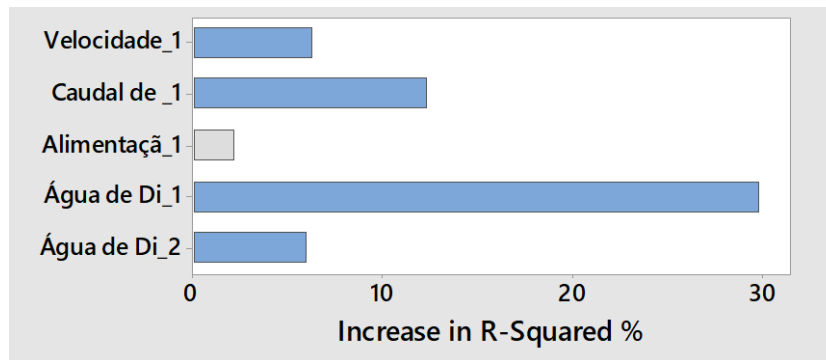


FIGURA 72: IMPACTO INCREMENTAL DAS DIVERSAS VARIÁVEIS

O modelo de regressão múltipla permitiu chegar a uma equação (2) para o cálculo do valor do D80 do OF dos Ciclones Primários, que se traduz da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 &D80 \text{ OF Ciclones Primários} \\
 &= -1888 + 2.326 X1 + 17.09 X2 + 21.9 X4 + 27.72 X5 - 0.006444 X4^2 \\
 &- 0.2371 X1 \times X2 - 0.2100 X4 \times X5
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Sendo:

- X1: Velocidade de Rotação do Moinho (% da velocidade crítica)
- X2: Caudal de Água da Caleira de Alimentação do Moinho (m³/h)
- X4: Água de Diluição do Tanque de Descarga do Moinho (m³/h)
- X5: Água de Diluição do UF dos Ciclones Primários (m³/h)

5.2.4.3 Regressão Múltipla Carga Interna vs. Velocidade de Rotação do Moinho, Caudal de Água da Caleira de Alimentação do Moinho, Recirculação de *Pebbles*, Água de Diluição do UF dos Ciclones Primários

A Figura 73 representa a relação estatística entre a variável carga interna do moinho e as restantes variáveis. É possível observar que o valor de p é inferior a 0.001 e, por conseguinte, existe uma relação estatística significativa entre a Carga Interna do Moinho e as restantes variáveis consideradas para o modelo de regressão.

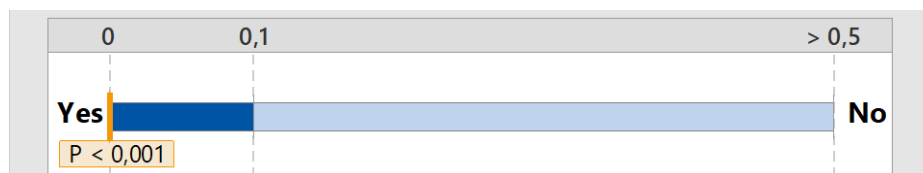


FIGURA 73: RELAÇÃO ESTATÍSTICA ENTRE A CARGA INTERNA DO MOINHO E AS RESTANTES VARIÁVEIS

Observando a Figura 74 é possível concluir que 72.12 % da variação da Carga Interna do Moinho pode ser explicada pelo modelo de regressão múltipla obtido.

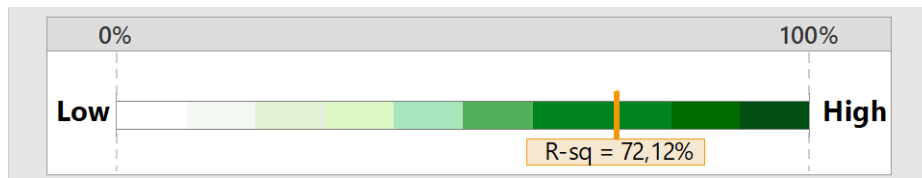


FIGURA 74: % DE VARIAÇÃO EXPLICADA PELO MODELO DE REGRESSÃO

As Figura 75 e Figura 76 mostram que a variável que maior influência tem no valor da carga interna do moinho é a recirculação de *pebbles*, seguida do caudal de água da caleira de alimentação do moinho.

Tanto a recirculação de *pebbles* como o caudal de água da caleira de alimentação do moinho contribuem para um aumento do valor de R^2 em cerca de 7.5 %.

A variável alimentação fresca não entrou na contabilização do modelo de regressão múltipla, pois é uma variável que não ajuda a explicar a variação adicional na carga interna do moinho.

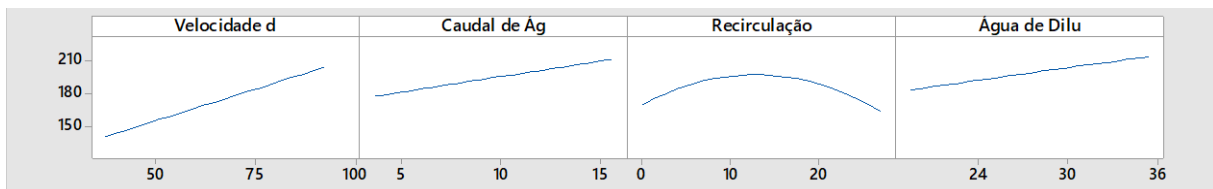


FIGURA 75: INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS DE VARIÁVEIS NA CARGA INTERNA DO MOINHO

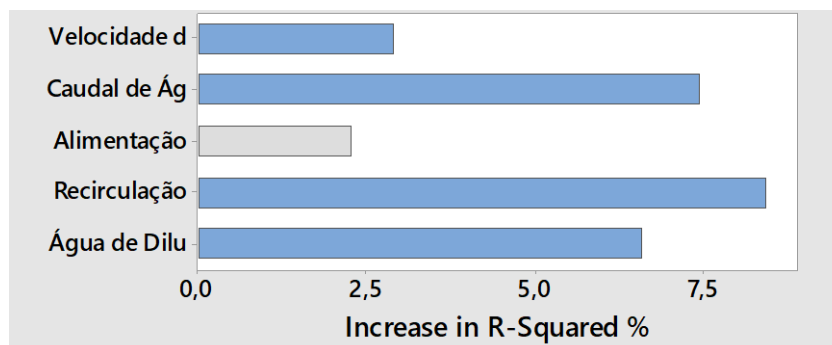


FIGURA 76: IMPACTO INCREMENTAL DAS DIVERSAS VARIÁVEIS

A equação obtida através do modelo de regressão múltipla e que permite o cálculo da carga interna do moinho tendo em consideração as variáveis consideradas é dada por (3):

$$\begin{aligned}
 \text{Carga Interna} = & -37.4 + 1.160 X_1 + 6.80 X_2 + 2.811 X_4 + 3.902 X_5 - 0.1676 X_4^2 \\
 & + 0.1643 X_2 \times X_4 - 0.2139 X_2 \times X_5
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Sendo:

X1: Velocidade de Rotação do Moinho (% da velocidade crítica)

X2: Caudal de Água da Caleira do Moinho (m³/h)

X4: Recirculação de *Pebbles* (t/h)

6. Conclusão

A primeira parte deste capítulo abrange as conclusões referentes à análise de dados realizada no capítulo anterior.

Na segunda parte deste capítulo, apresentam-se algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros, no âmbito deste tema.

6.1 Conclusões

Esta dissertação teve como principal objetivo a obtenção e análise de dados de operação do Moinho AG/SAG instalado na Mina de Neves-Corvo e a procura e verificação de correlações entre as diversas variáveis observadas e registadas.

Apesar de este não ser o objetivo definido inicialmente para a realização deste trabalho, pois como o tema diz seria a Otimização de Parâmetros Operacionais durante o Arranque do Moinho AG/SAG de Neves-Corvo, o facto de este trabalho ter sido desenvolvido exclusivamente em ambiente industrial e mais concretamente em ambiente de projeto, levou a que fosse necessário fazer um rearranjo do tema devido às condições operacionais observadas.

O facto de o Moinho AG/SAG ter trabalhado durante apenas alguns dias, fez com que não fosse possível proceder ao estudo e otimização dos parâmetros operacionais e limitou a quantidade de dados disponíveis para análise.

Da pesquisa bibliográfica consultada, verificou-se que apesar de moinhos de moagem Autógena e Semi-Autógena serem muito comuns em vários locais do mundo e estarem em utilização há vários anos, o moinho AG/SAG de Neves-Corvo, será o primeiro do seu tipo em funcionamento no nosso país, sendo por isso uma oportunidade única em Portugal de monitorizar o seu funcionamento com minério da Faixa Piritosa Ibérica.

Da observação e análise de dados realizada neste trabalho, foi possível concluir que o processo de comissionamento e arranque de um equipamento da dimensão de um Moinho AG/SAG, equipamento desconhecido para muitos, é um processo muito complexo e exigente. Os dados recolhidos e observados mostram a variabilidade desse processo e tentativas de se obter os melhores resultados desejados.

É possível concluir também com a realização deste trabalho que de modo a explicar o funcionamento de um equipamento com a complexidade de um moinho AG/SAG, há que ter em conta várias variáveis e não apenas um conjunto reduzido. O modo de funcionamento deste equipamento assim o exige, e estando ele tão dependente de variações logo à entrada, ter em conta diversos parâmetros ajudará seguramente a perceber melhor o seu comportamento.

Sendo possível encontrar correlações razoáveis entre pares de variáveis através de modelos de regressão linear simples, será certamente mais favorável recorrer a modelos de regressão múltipla de modo a explicar o funcionamento do moinho.

Um bom exemplo que mostra a vantagem de se considerar modelos de regressão múltipla, comparativamente a modelos entre pares de variáveis é o Torque. No caso de uma regressão entre um par de variáveis Torque vs. Carga interna, obteve-se um $R^2=63.96\%$ comparativamente a um $R^2=85.99$ para uma regressão múltipla. O facto de várias variáveis estarem a ser consideradas para o modelo aumenta significativamente a percentagem de correlação.

6.2 Propostas de Desenvolvimentos Futuros

Uma vez que o moinho AG/SAG trabalhou apenas durante alguns dias, como trabalho futuro, propõe-se a monitorização e análise de dados de operação futuros. A monitorização e análise desses dados de operação futuros, permitirá ter um universo de amostragem maior e possivelmente melhores modelos de regressão.

Como trabalho futuro seria também interessante fazer a monitorização e análise de dados de funcionamento desta vez para um funcionamento do moinho de modo Semi-Autógeno. Sendo o mecanismo de funcionamento do moinho em modo Autógeno e Semi-Autógeno significativamente diferentes, seria interessante verificar as diferenças de funcionamento entre o modo de funcionamento Semi-Autógeno e os dados e modelos obtidos para o funcionamento Autógeno.

Como trabalho final, seria também interessante e poderia trazer algumas melhorias operacionais, a utilização dos modelos de regressão obtidos de modo a otimizar os parâmetros operacionais de funcionamento do moinho.

Bibliografia

- Outotec, M. (2021). Portefólio Vertimill. Retrieved from <https://www.mogroup.com/portfolio/vertimill/>
- Beraldo, J. L. (1987). Moagem de minérios em moinhos tubulares. Edgard Blucher Ltda.
- Chaves, A. P. (2012). Projeto de instalações de britagem. In: CETEM/MCTI.
- Leite, M. R. M. (1987). Fragmentação e Classificação de Rochas e Minérios Porto.
- Lynch, A. (2015). Comminution handbook AusIMM Bulletin (Jun 2015).
- Markstrom, S. (2020). [PM AG Mill Load, Speed, Ore feed control].
- Napier-Munn, e. a. (1996). Mineral comminution circuits: their operation and optimization.
- Neves, L. S. (2018). Modelagem de desmonte de rocha para otimização da metodologia mine to mill. In: Araxá: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- Viklund. (2006). Evolution of AG mill control system at Boliden Mineral AB. Paper presented at the Proc. SAG.
- Wills, B. A., & Finch, J. (2015). Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery: Butterworth-Heinemann.
- Starkey & Associates Inc. (2015). SAGDesign Test Work and Comminution Analysis Report
- Orway Mineral Consultants (2020). Neves Corvo Zinc Expansion Project Comminution Circuit Evaluation.
- Thermo Fisher Scientific (2013). Belt Scale Ramsey Series 10172 Installation & Operation Manual.
- Woodgrove Technologies Inc. (2017). PRC Rock Characterization System Installation & Operation Manual
- Outotec (Finland) Oy (2019). SAG Mill Control Philosophy
- OSIsoft (2019). PI Datalink 2019 Guia do Usuário
- SOMINCOR. (2019). SOMINCOR - Operações. <https://somincor.com.pt/operacoes/>
- SOMINCOR. (2020). PLANO DE LAVRA - Processos Metalúrgicos.
- Hogg, R.; Fuerstenau, D. W. (1973). Power Relationships for Tumbling Mills.

Anexos

Anexo I: Dados de funcionamento do moinho AG/SAG ao longo do seu período de funcionamento
(20 de Janeiro de 2021 16:00 a 26 de Janeiro de 2021 3:00)

TABELA 11: DADOS DE FUNCIONAMENTO MOINHO AG/SAG

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
1	765.99	3133.14	77.45	15.16	853.43	56.79	20.45	143.72	24.30	198.52	46.00	110.23	24.35	4.48
2	772.51	2957.49	78.73	15.04	390.73	58.05	21.26	144.70	24.89	201.92	44.96	108.62	21.14	4.03
3	778.48	3061.09	80.03	14.97	461.70	57.07	21.43	140.49	21.38	203.43	46.15	109.41	20.98	4.01
4	738.86	2997.46	79.78	15.08	669.85	59.06	21.06	144.09	24.62	202.40	44.56	114.59	20.82	3.99
5	721.70	2934.18	80.14	14.97	687.14	59.27	19.90	146.80	23.74	200.42	43.61	114.44	20.66	4.02
6	736.27	2848.18	78.78	15.30	444.33	60.18	19.52	152.08	21.30	200.98	43.85	114.30	20.50	4.03
7	750.45	2844.22	78.80	15.07	1340.99	59.38	20.16	140.97	25.25	197.06	43.66	120.21	20.34	4.02
8	773.45	2982.68	78.79	14.92	525.03	57.22	19.77	164.34	26.03	197.21	44.92	119.99	20.18	4.00
9	732.36	2827.72	77.38	14.89	247.94	57.33	19.26	142.77	22.58	193.57	42.70	120.43	20.02	4.59
10	694.79	2637.87	76.33	14.87	1017.07	56.55	18.49	143.28	27.06	191.18	42.58	119.43	19.98	3.94
11	722.73	2709.23	75.12	14.61	517.45	56.83	18.50	142.25	24.38	191.59	41.28	120.02	19.98	4.38
12	677.76	2658.05	75.04	15.22	156.07	57.31	17.72	139.97	22.45	191.59	41.89	119.11	19.98	3.58
13	722.75	2658.61	75.02	14.96	115.73	55.91	18.40	146.20	15.97	192.42	40.89	119.21	19.97	4.01
14	768.09	2878.51	75.11	14.91	522.41	55.07	19.24	145.80	17.69	199.35	45.07	119.32	19.97	3.90

15	766.97	2969.69	76.18	15.04	7.44	56.74	19.88	139.32	19.56	203.35	45.23	119.43	19.97	4.04
16	729.38	2767.47	76.27	14.93	401.65	57.28	19.00	154.17	21.18	203.37	43.15	119.53	19.49	4.10
17	739.20	2720.52	76.20	14.96	774.66	57.33	19.41	137.32	21.71	202.35	43.31	119.70	20.31	4.18
18	706.82	2790.99	76.39	15.19	454.85	57.46	18.41	157.16	16.45	198.33	43.26	120.42	20.26	3.83
19	726.07	2806.76	76.33	14.76	499.56	57.40	18.48	157.27	12.16	193.37	42.75	121.15	20.21	3.94
20	779.15	2963.50	76.16	15.21	425.48	55.55	20.59	137.99	15.86	197.56	44.50	120.66	20.17	4.09
21	769.79	3088.37	76.43	15.35	509.59	55.16	19.61	163.42	13.81	213.24	47.76	120.35	20.12	4.38
22	855.01	3285.74	76.81	14.88	561.79	55.08	22.51	141.66	14.08	222.62	49.54	120.06	20.07	4.17
23	850.58	3141.81	76.90	14.98	464.60	56.97	21.41	147.34	18.23	224.48	49.49	119.76	20.02	3.97
24	850.76	3156.45	77.51	15.23	347.63	57.71	22.31	145.18	13.24	223.27	49.53	119.47	19.97	4.14
25	832.66	3199.30	77.58	14.78	219.00	58.19	21.93	141.47	14.52	223.51	50.06	119.25	19.89	3.69
26	878.79	3184.03	77.50	15.17	464.79	58.17	21.65	153.85	15.60	217.08	48.84	126.01	19.94	4.07
27	843.22	3155.36	78.17	15.32	196.69	58.69	21.90	150.83	15.05	218.45	48.89	125.21	20.57	4.29
28	819.49	3223.79	78.02	14.93	575.48	59.79	20.92	147.70	9.40	215.87	47.22	125.54	20.46	4.57
29	821.96	3225.68	78.00	15.18	583.98	58.69	21.83	133.75	10.04	215.87	48.58	125.64	20.35	4.14
30	841.11	3362.24	78.76	14.76	617.19	59.94	21.82	143.13	13.67	220.59	49.98	125.64	20.23	4.19
31	822.33	3309.40	79.40	15.29	636.64	62.10	22.24	151.30	15.15	229.11	50.37	130.85	20.12	3.82
32	856.75	3419.10	80.57	14.72	432.42	59.76	22.21	152.28	13.96	218.50	48.85	130.71	20.01	3.91
33	797.69	3284.10	80.76	14.74	643.86	59.17	22.58	146.72	15.36	211.66	48.46	130.58	19.89	3.96
34	779.99	3138.72	80.30	14.95	890.27	59.51	20.46	146.80	12.18	202.99	45.68	130.45	19.78	3.39
35	706.40	2833.25	79.22	15.65	416.45	59.00	19.29	151.75	9.74	194.46	44.12	130.31	20.12	4.14

36	697.91	2955.76	79.20	15.04	244.96	58.00	18.64	150.01	11.46	183.98	41.69	130.29	20.67	4.01
37	672.20	2547.55	78.01	14.72	1037.37	56.20	18.83	147.32	6.22	175.55	39.59	130.29	21.21	3.97
38	654.95	2600.07	76.80	14.71	539.58	59.85	17.57	147.08	5.78	181.41	39.85	130.29	19.82	3.99
39	646.93	2528.41	76.20	14.99	104.37	56.99	16.31	154.74	7.32	178.05	40.15	130.29	19.85	3.97
40	721.35	2712.35	76.22	15.47	702.57	54.80	19.82	137.84	9.46	181.65	41.45	130.29	19.88	3.95
41	794.13	3087.90	76.24	14.79	429.65	54.22	23.99	132.50	8.12	206.99	48.61	130.29	19.91	4.00
42	880.33	3366.77	77.44	15.54	558.94	57.63	22.00	153.30	6.81	229.31	51.74	130.29	19.94	4.05
43	884.61	3573.00	78.56	14.92	386.36	58.20	24.23	138.01	10.09	239.48	53.62	135.25	19.97	4.24
44	904.88	3539.47	79.29	14.75	559.96	56.79	25.33	139.62	8.22	232.19	53.09	135.06	35.41	3.99
45	852.45	3259.01	79.89	14.70	34.82	55.84	22.63	131.44	7.49	210.85	49.55	134.86	35.32	4.33
46	781.69	3042.38	80.21	14.88	407.04	55.65	22.03	138.71	7.19	197.85	45.38	134.66	35.22	3.80
47	776.17	3187.17	80.01	14.87	1556.10	56.45	22.09	130.68	8.20	197.01	45.78	139.29	25.67	4.49
48	767.75	3093.12	80.07	15.17	450.92	55.67	21.73	140.65	9.74	198.82	45.91	139.35	25.61	3.85
49	785.10	3215.22	80.65	14.93	461.52	54.32	21.78	142.84	5.23	198.54	44.13	139.41	25.55	4.18
50	785.07	3038.36	81.29	14.87	949.14	54.04	22.34	148.08	4.71	200.91	45.88	139.46	25.49	3.76
51	730.98	2984.77	81.28	14.98	80.93	55.86	22.52	136.78	6.97	205.02	43.59	139.81	25.43	3.77
52	697.71	2834.28	81.10	5.02	781.37	62.04	22.04	132.88	11.83	193.28	41.38	150.14	25.37	3.74
53	608.54	2452.95	80.67	4.92	532.26	59.88	17.53	144.26	9.66	176.97	36.56	150.24	25.31	3.95
54	571.69	2310.00	80.52	4.94	487.70	59.02	17.43	121.87	6.85	171.78	35.42	150.34	25.25	4.06
55	593.54	2529.60	81.28	5.17	447.98	57.82	18.28	126.65	7.42	174.92	35.02	150.45	25.21	3.99
56	684.07	2756.73	81.93	4.86	389.64	56.52	20.33	132.14	4.67	177.77	40.24	150.55	25.17	4.73

57	686.18	2841.33	82.51	5.11	462.93	52.98	21.59	140.15	5.86	179.94	41.24	150.65	25.14	4.07
58	710.81	2949.09	83.21	4.82	506.52	52.53	22.20	127.37	5.68	181.61	41.81	150.75	25.11	3.97
59	699.47	2778.54	83.19	4.95	556.78	55.67	19.94	154.29	7.18	176.32	39.72	150.85	25.07	3.74
60	681.11	2685.56	83.12	4.93	543.58	56.42	26.55	135.47	4.46	177.10	40.31	150.71	25.04	4.05
61	671.21	2712.54	83.86	4.89	335.18	56.43	22.26	127.21	5.52	175.67	40.42	150.20	24.41	4.01
62	676.79	2855.39	85.69	5.10	252.49	56.31	22.20	129.42	4.05	177.18	40.43	149.68	24.48	4.12
63	673.01	2910.72	86.17	5.01	136.52	56.05	21.40	135.93	0.04	177.58	40.51	149.17	24.54	4.34
64	675.81	2994.05	87.61	4.90	907.46	57.69	22.47	134.94	4.59	184.51	40.55	149.73	24.61	3.67
65	705.19	3050.63	88.72	4.99	433.72	57.85	23.32	132.53	2.91	194.13	41.48	150.11	24.68	3.92
66	703.99	3024.18	86.22	4.94	460.53	55.75	23.45	131.61	2.86	194.97	42.77	150.12	24.74	3.94
67	684.25	2995.59	86.10	4.74	303.86	55.63	23.44	126.65	3.32	191.11	41.74	150.13	24.81	4.33
68	631.28	2853.50	86.31	5.60	745.62	55.13	440.97	0.17	2.01	181.55	39.66	150.14	24.87	3.97
69	646.09	2702.25	86.25	5.20	933.88	55.04	21.83	131.67	3.44	178.50	37.42	150.21	24.94	3.95
70	593.99	2523.56	87.46	4.97	28.12	55.79	20.04	131.82	0.89	184.40	34.41	150.41	24.94	4.01
71	656.38	2851.72	87.54	4.87	443.12	54.61	21.25	136.02	1.04	183.43	37.08	150.62	24.94	3.93
72	642.61	2753.95	88.82	5.35	338.96	54.15	21.96	127.57	0.07	184.90	37.66	149.32	24.94	3.91
73	618.79	2785.42	88.69	5.24	560.10	56.19	20.84	128.38	0.56	176.66	37.95	149.36	24.94	4.03
74	546.27	2485.48	88.81	3.64	518.90	58.19	18.79	125.72	0.85	168.73	32.24	149.39	24.94	4.14
75	548.69	2353.41	86.20	4.97	471.41	59.00	17.93	129.31	0.10	158.38	31.15	149.42	24.94	4.02
76	539.22	2260.53	86.14	5.08	599.21	57.10	16.46	135.47	0.31	157.99	31.34	149.46	24.94	4.07
77	542.44	2286.59	86.28	4.90	415.32	56.99	16.03	143.10	0.02	159.46	31.19	149.49	24.94	3.93

78	523.71	2335.23	86.78	5.03	455.26	56.78	16.97	138.58	0.26	166.94	31.70	149.56	24.90	3.96
79	496.19	2315.81	88.67	5.08	591.36	59.20	466.29	42.24	2.94	160.44	30.23	149.66	24.86	3.96
80	499.00	2096.00	87.57	4.98	272.17	59.30	17.34	109.42	1.96	157.39	29.76	149.76	24.81	3.99
81	514.17	2137.39	87.55	4.83	727.35	59.13	15.32	138.49	2.71	161.28	29.74	149.85	24.77	3.49
82	540.00	2175.84	87.49	4.73	441.81	60.83	15.56	147.29	0.46	165.02	29.41	149.99	24.73	4.20
83	544.33	2226.66	88.04	4.84	465.14	61.01	17.60	126.80	0.63	168.53	29.22	150.18	25.33	4.08
84	507.53	2245.63	88.66	4.88	600.02	59.91	17.27	117.96	1.03	170.79	30.19	150.36	25.20	4.07
85	555.45	2365.66	88.73	4.94	424.27	58.35	17.09	130.56	1.25	171.68	31.08	145.37	25.07	4.13
86	552.44	2408.03	89.93	5.21	503.40	58.25	16.54	137.77	1.05	176.24	31.85	150.31	24.94	4.02
87	513.95	2198.85	89.96	5.17	468.63	60.18	18.10	129.23	1.38	174.27	29.96	150.38	24.81	4.04
88	515.70	2302.36	89.97	5.00	661.97	58.38	17.23	144.24	0.02	171.97	30.22	150.61	24.67	3.71
89	512.60	2270.62	88.66	5.22	485.22	56.48	16.37	131.24	2.25	166.35	30.79	150.85	24.54	4.10
90	547.33	2384.97	88.71	4.93	335.47	56.24	18.97	136.62	1.51	174.49	32.45	151.08	24.52	4.02
91	573.37	2430.36	88.81	4.86	718.88	54.18	17.82	134.40	0.55	178.11	33.34	149.39	24.58	3.98
92	581.34	2463.89	90.01	5.14	653.51	56.06	16.96	144.31	1.75	182.32	32.78	150.42	24.64	4.00
93	550.24	2554.80	90.00	4.84	582.86	57.22	91.52	90.67	0.71	182.81	32.83	150.69	24.69	4.08
94	548.92	2358.94	90.02	5.05	388.04	57.67	17.71	133.75	0.19	182.19	30.95	150.66	24.75	4.15
95	488.93	2328.78	89.98	3.94	333.88	60.79	17.52	135.38	0.91	177.59	30.11	150.63	24.81	3.94
96	533.53	2337.05	89.94	4.99	180.69	60.40	16.00	143.86	0.06	177.50	30.46	150.61	24.86	3.94
97	522.19	2230.42	89.88	4.94	452.50	59.54	15.71	147.98	0.91	169.94	29.99	150.58	24.92	4.36
98	509.64	2278.27	89.93	4.64	270.59	58.82	16.21	141.30	1.47	164.54	29.70	150.55	24.95	3.89

99	518.74	2167.33	89.97	5.93	420.31	57.01	16.76	132.41	2.86	165.85	28.54	149.93	24.96	3.94
100	521.46	2399.69	90.00	4.86	1117.62	55.36	17.80	136.49	3.34	175.61	30.36	149.11	24.97	3.98
101	567.75	2557.16	90.02	5.09	178.40	54.72	32.05	11.30	1.70	185.15	32.75	149.78	24.99	3.93
102	528.31	2357.73	88.80	4.98	953.12	54.84	18.08	127.88	2.57	177.42	31.58	149.90	25.00	3.89
103	512.48	2261.31	88.84	4.78	280.37	54.70	18.00	121.71	1.27	162.11	30.22	150.02	25.01	3.98
104	517.60	2161.41	88.78	4.72	453.21	53.71	16.96	134.33	0.60	169.35	30.18	150.14	25.06	4.21
105	538.84	2359.11	88.72	4.82	755.41	54.77	18.55	122.46	3.78	183.13	31.21	150.26	25.11	4.00
106	492.57	858.05	37.42	4.93	375.72	39.86	500.00	-0.08	0.65	130.24	27.63	110.37	34.51	3.96
107	521.41	2032.35	86.20	4.95	403.21	49.41	15.60	136.91	0.05	160.73	29.50	150.49	26.42	3.99
108	586.10	2469.40	88.78	4.92	481.59	52.46	19.66	117.03	2.31	184.85	33.28	150.40	26.08	4.01
109	563.52	2437.40	88.83	10.39	360.23	54.53	19.21	118.21	2.88	189.13	33.44	145.30	25.74	4.06
110	559.03	2420.63	88.73	10.25	617.07	55.85	19.04	129.20	2.92	190.50	32.61	145.32	25.40	4.15
111	519.25	2292.33	88.72	7.71	614.11	58.98	18.02	130.39	0.78	188.94	30.47	145.35	29.70	3.97
112	537.97	2383.42	88.70	5.45	577.38	59.40	17.82	143.66	0.13	181.64	31.76	145.37	30.04	4.00
113	567.19	2559.78	88.72	5.00	420.59	55.45	18.79	139.23	0.05	179.44	33.64	145.40	30.03	4.00
114	586.97	2580.48	90.00	5.16	685.68	52.16	19.67	132.34	0.04	185.19	34.65	145.42	30.02	3.34
115	594.45	2712.90	89.99	4.31	469.03	51.99	20.11	138.78	0.17	200.52	36.41	145.45	30.01	4.08
116	640.92	2944.93	91.29	4.90	497.08	51.60	22.94	134.76	7.18	211.30	39.38	145.47	30.00	3.89
117	645.91	2953.04	92.44	5.20	581.10	54.30	22.35	137.53	14.84	213.29	36.91	145.45	29.99	3.91
118	563.78	2639.52	92.43	4.93	0.99	53.43	19.54	134.24	7.45	190.81	32.77	145.12	29.98	3.93
119	525.29	2340.97	91.19	5.20	342.32	58.61	18.09	124.67	10.20	198.86	29.66	145.09	29.97	5.04

120	531.69	2253.59	87.48	5.05	262.68	60.85	17.02	135.87	9.16	197.77	31.24	145.09	29.81	3.96
121	565.63	2368.77	84.89	5.22	485.60	59.14	18.27	125.56	9.74	190.90	32.78	145.09	29.66	3.95
122	570.24	2468.46	83.70	5.02	120.71	56.75	18.48	120.52	15.18	190.99	33.78	144.69	29.93	3.91
123	589.97	2432.27	85.03	4.94	431.11	56.58	17.47	132.77	13.75	199.36	33.17	145.29	29.53	3.55
124	587.84	2359.02	83.68	5.58	431.84	56.07	17.23	127.78	8.99	200.52	35.12	146.11	29.18	4.26
125	614.33	2577.78	82.43	4.80	712.49	54.17	19.22	122.54	7.40	199.96	36.03	144.27	30.95	4.12
126	661.47	2707.06	82.50	5.13	364.22	50.92	18.43	138.47	5.15	206.21	38.96	145.15	30.49	4.12
127	708.45	2943.91	85.05	10.31	418.76	51.65	20.46	145.33	6.59	217.18	39.88	144.26	30.87	3.96
128	664.15	2772.27	86.24	10.32	386.93	54.76	22.16	132.10	7.44	219.96	39.22	144.73	30.81	3.96
129	652.83	2889.14	86.37	9.93	214.57	53.44	19.80	143.97	6.96	207.08	38.13	146.12	30.68	3.92
130	673.36	2924.09	86.31	10.14	498.60	53.37	20.32	130.60	5.53	210.63	39.79	145.87	30.95	3.94
131	625.14	2646.03	87.50	14.87	439.55	52.77	20.65	128.51	7.15	203.72	37.80	144.88	28.80	3.98
132	538.28	1039.99	37.51	8.50	384.57	18.85	500.00	0.12	1.52	142.32	32.09	145.48	29.77	3.94

Legenda

C1 - NºHoras (Horas de Operação); **C2**- Corrente Moinho AG/SAG (Amperes); **C3** - Potência Motor Moinho AG/SAG (kW),
C4 - Velocidade de Rotação Moinho AG/SAG (%); **C5** - Caudal de Água Caleira de Alimentação do Moinho AG/SAG (m3/h);
C6 - Caudal Alimentação Ciclones Primários (m3/h); **C7** - Percentagem Sólidos Alimentação Ciclones Primários (%);
C8- Consumo Especifico Energia Moinho AG/SAG (kWh/t); **C9** - Caudal de Sólidos da Alimentação Fresca/Nova Moinho AG/SAG (t/h);
C10 - Caudal de Recirculação de Pebbles (t/h); **C11** - Carga Interna Moinho AG/SAG (t); **C12**- Torque Moinho (N.m);
C13 - Caudal de Água de Diluição Tanque Descarga Moinho AG/SAG (m3/h); **C14**- Caudal de Água de Diluição Underflow Ciclones Primários (m3/h);
C15 - Caudal de Água Chuveiros Trommel de Descarga Moinho AG/SAG (m3/h).

Anexo II: Dados da Amostragem do *Overflow* dos Ciclones Primários
(20 de Janeiro de 2021 16:00 a 26 de Janeiro de 2021 3:00)

TABELA 12: DADOS DA AMOSTRAGEM DO OF DOS CICLONES PRIMÁRIOS

NºHoras	% Sólidos	D80 Malvern (µm)
1	NaN	NaN
2	NaN	NaN
3	NaN	NaN
4	NaN	NaN
5	NaN	NaN
6	NaN	NaN
7	NaN	NaN
8	NaN	NaN
9	NaN	NaN
10	NaN	NaN
11	NaN	NaN
12	47.55	35.70
13	46.98	35.11
14	46.86	34.70
15	47.34	33.80
16	47.52	33.40
17	47.43	33.60
18	47.34	33.80
19	47.40	32.35
20	47.52	30.90
21	47.64	30.96
22	47.79	31.14
23	47.99	31.42
24	48.24	31.78
25	48.79	32.20
26	49.58	32.67
27	50.20	33.18
28	50.60	33.70
29	50.97	34.22
30	51.27	34.73
31	51.48	35.20
32	51.56	35.63
33	50.79	35.98
34	49.06	36.26
35	47.22	36.44
36	46.13	36.50
37	45.73	36.06

38	45.41	35.10
39	45.19	34.14
40	45.11	33.70
41	46.12	34.45
42	47.99	35.85
43	49.00	36.60
44	48.44	35.85
45	47.12	34.07
46	45.54	31.93
47	44.22	30.15
48	43.66	29.40
49	43.87	29.43
50	44.29	29.50
51	44.60	29.60
52	44.73	30.11
53	44.83	31.17
54	44.91	32.41
55	44.99	33.48
56	45.10	34.00
57	45.28	34.12
58	45.51	34.22
59	45.71	34.28
60	45.79	34.30
61	45.75	34.16
62	45.66	33.78
63	45.50	33.23
64	45.31	32.60
65	44.64	31.36
66	43.43	29.47
67	42.28	27.75
68	41.76	27.00
69	41.88	27.09
70	42.15	27.33
71	42.48	27.71
72	42.75	28.20
73	42.97	30.27
74	43.19	34.12
75	43.36	37.84
76	43.43	39.50
77	42.10	38.55
78	40.76	37.60
79	41.11	40.37
80	41.69	44.10

81	42.12	45.93
82	42.55	46.80
83	43.13	45.81
84	43.48	43.90
85	42.38	40.94
86	41.28	38.90
87	42.08	39.95
88	42.87	41.00
89	42.24	38.72
90	41.31	36.20
91	40.70	35.76
92	40.12	35.45
93	39.68	35.26
94	39.51	35.20
95	40.09	36.39
96	41.38	39.00
97	42.67	41.61
98	43.25	42.80
99	43.10	42.47
100	42.69	41.61
101	42.08	40.40
102	41.30	39.00
103	38.95	36.40
104	34.86	32.54
105	30.98	29.03
106	29.25	27.50
107	31.52	29.52
108	36.53	33.95
109	41.53	38.38
110	43.80	40.40
111	43.80	40.33
112	43.80	40.12
113	43.79	39.81
114	43.78	39.40
115	43.76	38.92
116	43.74	38.39
117	43.71	37.83
118	43.67	37.27
119	43.62	36.71
120	43.56	36.18
121	43.49	35.70
122	43.40	35.29
123	43.30	34.98

124	43.19	34.77
125	43.06	34.70
126	NaN	NaN
127	NaN	NaN
128	NaN	NaN
129	NaN	NaN
130	NaN	NaN
131	NaN	NaN
132	NaN	NaN