

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FLAVIO HELMER FERRO

**APLICAÇÃO DE MODELAGEM EM REGRESSÃO LINEAR PARA  
SOLUÇÃO DE LIMITAÇÃO OPERACIONAL EM UMA PRENSA DE  
ROLOS DE ALTA PRESSÃO**

VITÓRIA, ES  
2018

FLAVIO HELMER FERRO

**APLICAÇÃO DE MODELAGEM EM REGRESSÃO LINEAR PARA  
SOLUÇÃO DE LIMITAÇÃO OPERACIONAL EM UMA PRENSA DE  
ROLOS DE ALTA PRESSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof. Dra. Jussara Farias Fardin

VITÓRIA, ES  
2018

**FLAVIO HELMER FERRO**

**APLICAÇÃO DE MODELAGEM EM REGRESSÃO LINEAR PARA  
SOLUÇÃO DE LIMITAÇÃO OPERACIONAL EM UMA PRENSA DE  
ROLOS DE ALTA PRESSÃO**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 5 de dezembro de 2018.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dra. Jussara Farias Fardin - Orientadora**  
**Universidade Federal do Espírito Santo - UFES**

---

**Prof. Ph.D. Domingos Sávio Lyrio Simonetti– Examinador Interno**  
**Universidade Federal do Espírito Santo – UFES**

---

**Prof. Ph.D. Gilberto Costa Drumond Sousa – Examinador Externo**  
**Universidade Vila Velha – UVV**

---

**Prof. Dr. Marcio Almeida Có – Examinador Externo**  
**Instituto Federal do Espírito Santo - IFES**

***Mensagem***

*“Mas bendito é o homem cuja confiança está no Senhor, cuja confiança nele está.  
Ele será como uma árvore plantada junto às águas e que estende as suas raízes  
para o ribeiro. Ela não temerá quando chegar o calor, porque as suas folhas estão  
sempre verdes; não ficará ansiosa no ano da seca nem deixará de dar fruto”*

*Jeremias 17.7,8*

*Dedicatória*

A Deus, criador e mantenedor da vida, pois

“Tudo o que fizerem, façam de todo o coração, como para o Senhor, e não para os homens”.

Colossenses 3.23.

## Agradecimentos

Ao Senhor Jesus, “Pois Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas. A Ele seja a glória para sempre! Amém” - Romanos 11.36. Por sua misericórdia, amor e fidelidade durante todos os meus dias.

A minha querida e linda esposa Luciana, a minha “Luzinha”, que a cada dia me ensina a ser uma pessoa melhor e um homem cada vez mais apaixonado. Você é a personificação da mulher de Provérbios 31. Obrigado por escolher me amar. “Quando não estás aqui, sinto falta de mim mesmo”, parte da música Sete Cidades da banda Legião Urbana.

Aos meus tesouros Sophia Maria, João Miguel e Catharina, motivos de júbilo ao meu coração, pois “Os filhos são herança do Senhor, uma recompensa que ele dá. Como flechas nas mãos do guerreiro são os filhos nascidos na juventude. Como é feliz o homem cuja aljava está cheia deles!”, Salmo 127.3-5a. Amo e aprendo todos os dias com vocês.

A minha querida mãe Marlene, por sonhar com o curso de eletrotécnica e escolher a minha profissão, e batalhar e apoiar incondicionalmente durante todas as fases da minha vida. Ao meu pai Valdir, o meu agradecimento.

Ao Gilson Junior, meu “pai”, por me mostrar o Caminho e ser um verdadeiro mestre e discipulador durante todos esses anos. Sem você e sua família seria tudo diferente.

A minha orientadora Jussara, que sem você e sua persistência, eu não estaria escrevendo essas linhas. Através do seu exemplo, ensina mais que a formação necessária ao mercado de trabalho. Ensina a forma correta, a dedicação, o respeito e o amor que devemos ter uns com os outros. O meu especial agradecimento por aceitar esse desafio e caminhar junto a mim.

A todos os mestres da UFES, em especial ao Gilberto Drumond e Jose Denti, que amam a nobre missão de ensinar e conseguiram passar esse amor aos seus alunos. Vocês, junto com a Jussara, influenciaram a vida de uma geração de profissionais.

Ao Clynton Oliveira, “amigo mais apegado que um irmão” – Provérbios 18.24b. Sem você não seria possível a conclusão desse projeto. Obrigado pela sua persistência e dedicação.

A Vale pelo constante incentivo ao estudo e desenvolvimento pessoal e profissional de seus colaboradores, e esses competentes e dedicados, que diariamente vivem os valores “a vida em primeiro lugar, valorizar quem faz a nossa empresa, cuidar do nosso planeta, agir de forma correta, crescer e evoluir juntos, e fazer acontecer.” Como é bom fazer parte dessa empresa e da presença de todos vocês.

## Resumo

Ganho de superfície específica, eficiência energética e custo específico de prensagem são importantes indicadores de desempenho para Prensa de Rolos de Alta Pressão, *High Pressure Grinding Rolls* – HPGR. Instalada em uma usina de pelotização de minério de ferro, a HPGR apresentada nessa dissertação, desde a sua implantação apresentava limitações operacionais. Para identificação das causas dessas limitações e quantificar as influências das variáveis de processo, foram realizados testes em 13 cenários operacionais no próprio equipamento por equipe multidisciplinar. A Modelagem por Regressão Linear foi utilizada como metodologia para determinar o modelo probabilístico para solução no sistema de controle da HPGR, apresentando ganho de superfície específica para o material cominuído. Esse ganho representa melhor qualidade da pelota, maior produtividade e redução do consumo energético nos moinhos e melhor uniformidade das pelotas pela redução de carga circulante no pelotamento.

**Palavras-chave:** Modelagem por Regressão Linear, Simulação, Controle, Minério de Ferro, HPGR.

## Abstract

Specific surface gain, energy efficiency and specific grinding costs are key performance indicators of a high pressure grinding rolls – HPGR. Installed in an iron ore pelletizing plant, the HPGR addressed on this dissertation, since its startup have been working with operational limitations. Have been analyzed 13 scenarios in the own equipment with a multidisciplinary team to quantify the influence of operational variables and identify the causes of the problem. The linear regression modeling was used as a methodology to determine the probabilistic model for solution for the control system of the HPGR, increasing the process results. This gain represents better pellet quality, higher productivity and reduced energy consumption in the mills and better uniformity of the pellets by reducing current load on pelletizing.

**Keywords:** Linear regression Modeling, Simulation, Control, Iron Ore, HPGR.



## Sumário

|  |    |
|--|----|
| Sumário .....  | 9  |
| Lista de Figuras .....   | 12 |
| Lista de Tabelas.....  | 14 |
| Lista de Abreviaturas .....  | 15 |
| 1. Introdução.....   | 16 |
| 2. Revisão Bibliográfica.....  | 18 |
| <b>2.1 Cominuição</b> .....  | 18 |
| <b>2.2 Abrasão, Compressão e Impacto</b> .....                                   | 18 |
| 2.2.1 Abrasão.....   | 19 |
| 2.2.2 Compressão .....   | 19 |
| 2.2.3 Impacto .....  | 20 |
| <b>2.3 Processos de Cominuição</b> .....   | 21 |
| <b>2.4 “Leis” da Cominuição</b> .....  | 21 |
| <b>2.5 Prensa de Rolos de Alta Pressão - High Pressure Grinding Rolls</b> .....  | 25 |
| 2.5.1 Histórico .....  | 25 |
| 2.5.2 Princípio de Funcionamento .....   | 27 |
| 2.5.3 Componentes da HPGR.....   | 30 |
| 3. High Pressure Grinding Rolls – 3PR7 .....                                     | 39 |
| <b>3.1 Histórico das HPGR na Vale</b> .....                                      | 39 |
| <b>3.2 Dados Nominais e Características</b> .....                                | 40 |
| 4. Limitações Operacionais e Diagnóstico da Causa.....                           | 45 |
| <b>4.1 Limitações Operacionais da HPGR 3PR7</b> .....                            | 45 |
| <b>4.2 Metodologia de Testes das Limitações Operacionais da HPGR</b> .....       | 47 |
| 5. Modelagem por Regressão Linear como Solução para Limitações Operacionais..... | 56 |
| <b>5.1 Modelagem por Regressão Linear</b> .....                                  | 56 |
| 5.1.1 Modelo de Regressão Linear Simples .....                                   | 56 |
| 5.1.2 Modelo de Regressão Linear Múltipla .....                                  | 57 |
| <b>5.2 MRL para Definição da Rotação da HPGR</b> .....                           | 58 |
| <b>5.3 Definição da Rotação Mínima para Operação da HPGR</b> .....               | 63 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 5.4   | <b>Resultado Preliminar da Aplicação da MRL na HPGR</b> ..... | 64 |
| 6.    | <b>Conclusão</b> .....  | 66 |
| 6.1   | <b>Avaliação dos Resultados</b> .....                         | 66 |
| 6.2   | <b>Sugestões para Trabalhos Futuros</b> .....                 | 67 |
| 6.3   | <b>Considerações Finais</b> .....                             | 68 |
|       | <b>Referências Bibliográficas</b> .....                       | 69 |
|       | <b>Anexo 1: Tipo de Britadores</b> .....                      | 74 |
| 1.1   | <b>Britador de Mandíbulas</b> .....                           | 74 |
| 1.2   | <b>Britador Giratório</b> .....                               | 75 |
| 1.3   | <b>Britador de Impacto</b> .....                              | 76 |
| 1.4   | <b>Britadores de Impacto Vertical</b> .....                   | 77 |
| 1.5   | <b>Britador Cônico</b> .....                                  | 77 |
| 1.6   | <b>Britador de Rolos</b> .....                                | 78 |
| 1.7   | <b>Britador de Rolo Dentado</b> .....                         | 79 |
|       | <b>Anexo 2: Variáveis de Processo de uma HPGR</b> .....       | 80 |
| 2.1   | <b>Ângulos de Intertravamento e Compressão</b> .....          | 80 |
| 2.2   | <b>Pressão Específica</b> .....                               | 81 |
| 2.3   | <b>Pressão Máxima Entre os Rolos</b> .....                    | 81 |
| 2.4   | <b>Vazão Mássica</b> .....                                    | 82 |
| 2.5   | <b>Vazão Mássica Específica</b> .....                         | 82 |
|       | <b>Anexo 3: Minério de Ferro e Pelotização</b> .....          | 84 |
| 3.1   | <b>Minério de Ferro</b> .....                                 | 84 |
| 3.1.1 | Principais Minerais Portadores de Ferro .....                 | 84 |
| 3.1.2 | Gênese dos Minérios de Ferro .....                            | 85 |
| 3.2   | <b>Unidades de Beneficiamento</b> .....                       | 87 |
| 3.3   | <b>Pelotização</b> .....                                      | 88 |
| 3.3.1 | Empilhamento e Homogeneização .....                           | 89 |
| 3.3.2 | Moagem e Classificação .....                                  | 90 |
| 3.3.3 | Espessamento .....  | 92 |
| 3.3.4 | Homogeneização .....  | 93 |
| 3.3.5 | Filtragem.....  | 93 |
| 3.3.6 | Prensagem.....  | 95 |
| 3.3.7 | Adição de Aglomerante e/ou Fundentes.....                     | 96 |
| 3.3.8 | Mistura.....  | 96 |
| 3.3.9 | Pelotamento .....   | 96 |

|                                      |   |     |
|--------------------------------------|---|-----|
| 3.3.10                               | Peneiramento .....                      | 99  |
| 3.3.11                               | Queima .....                            | 100 |
| 3.3.12                               | Peneiramento de Pelotas Queimadas ..... | 105 |
| 3.3.13                               | Empilhamento de Pelotas Queimadas ..... | 105 |
| Apêndice A: Produção Científica..... |   | 107 |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA HPGR E COMPRESSÃO DO LEITO DE PARTÍCULAS .....                     | 16 |
| FIGURA 2 – HPGR E ETAPAS TÍPICAS QUE COMPÕEM O PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO. ....                | 17 |
| FIGURA 3 - MECANISMO DE FRAGMENTAÇÃO POR ABRASÃO. ....  | 19 |
| FIGURA 4 - MECANISMO DE FRAGMENTAÇÃO POR COMPRESSÃO. ....   | 20 |
| FIGURA 5 - MECANISMO DE FRAGMENTAÇÃO POR IMPACTO. ....  | 20 |
| FIGURA 6 - RELAÇÃO ENTRE ENERGIA E TAMANHO DA PARTÍCULA NA COMINUIÇÃO. ....                                     | 24 |
| FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA PRENSA DE ROLOS MODERNA .....                                       | 26 |
| FIGURA 8 – FUNCIONAMENTO DA PRENSA DE ROLOS DE ALTA PRESSÃO. ....   | 27 |
| FIGURA 9 – ACUMULADORES DE NITROGÊNIO (A) E PISTÕES HIDRÁULICOS (B) .....                                       | 29 |
| FIGURA 10 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DA ZONA DE INTERTRAVAMENTO E DE COMPRESSÃO. ....                               | 30 |
| FIGURA 11 – EXEMPLOS DE HPGR: A ESQUERDA A FLSMIDTH A/S E A DIREITA A METSO. ....                               | 30 |
| FIGURA 12 – TIPOS DE ROLOS - A) INTEIROS, B) ANEL, C) SEGMENTADOS. ....   | 31 |
| FIGURA 13 – A SUPERFÍCIE DE ROLO COM <i>STUDS</i> E A CAMADA AUTÓGENA QUE SE FORMA ENTRE OS <i>STUDS</i> . .... | 32 |
| FIGURA 14 – DETALHE DOS <i>STUDS</i> . ....   | 33 |
| FIGURA 15 – DESGASTE DO REVESTIMENTO NAS DIFERENTES REGIÕES DO ROLO. ....                                       | 33 |
| FIGURA 16 – CONSEQUÊNCIA DA SEGREGAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO. ....   | 36 |
| FIGURA 17 – MODELO SIMPLIFICADO DO SISTEMA HIDRÁULICO. ....   | 37 |
| FIGURA 18 – HPGR 3PR7 PERTENCENTE A VALE EM VITÓRIA, ES. ....   | 39 |
| FIGURA 19 – PRINCIPAIS COMPONENTES DA HPGR 3PR7. ....   | 40 |
| FIGURA 20 – DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO DA HPGR 3PR7. ....   | 41 |
| FIGURA 21 – MOTORES DE ACIONAMENTO DA HPGR 3PR7. ....   | 42 |
| FIGURA 22 – DIAGRAMA DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA. ....  | 42 |
| FIGURA 23 – FORMA DE ONDA PARA CORRENTE E TENSÃO NA SAÍDA DO INVERSOR. ....                                     | 43 |
| FIGURA 24 – DIAGRAMA DE BLOCO PARA CONTROLE DE TORQUE DIRETO – DIRECT TORQUE CONTROL, DTC. ....                 | 44 |
| FIGURA 25 – VARIABILIDADE DO GANHO DA HPGR 3PR7 VARIANDO DE 103 A 521 CM <sup>2</sup> /G. ....                  | 45 |
| FIGURA 26 – EXEMPLO DE LIMITAÇÃO OPERACIONAL DA HPGR 3PR7. ....   | 46 |
| FIGURA 27 – A LIMITAÇÃO DA CORRENTE DO MOTOR GERANDO PARADA DA HPGR 3PR7. ....                                  | 47 |
| FIGURA 28 – CORRENTES EFICAZES MEDIDAS NO INTERVALO DO CENÁRIO 1. ....  | 48 |
| FIGURA 29 – CORRENTES EFICAZES MEDIDAS NO INTERVALO DO CENÁRIO 2. ....  | 49 |
| FIGURA 30 – CORRENTES EFICAZES MEDIDAS NO INTERVALO DO CENÁRIO 3. ....  | 50 |
| FIGURA 31 – CORRENTES EFICAZES MEDIDAS NO INTERVALO DO CENÁRIO 4. ....  | 50 |
| FIGURA 32 – CORRENTES EFICAZES MEDIDAS NO INTERVALO DO CENÁRIO 5. ....  | 51 |
| FIGURA 33 – CORRENTES EFICAZES MEDIDAS NO INTERVALO DO CENÁRIO 6. ....  | 52 |
| FIGURA 34 – CORRENTES EFICAZES MEDIDAS NO INTERVALO DO CENÁRIO 7. ....  | 52 |
| FIGURA 35 – CORRENTES EFICAZES MEDIDAS NO INTERVALO DO CENÁRIO 9. ....  | 53 |
| FIGURA 36 – CORRENTES EFICAZES MEDIDAS NO INTERVALO DO CENÁRIO 10. ....   | 54 |
| FIGURA 37 – BLOCOS UTILIZADOS PELO <i>SOFTWARE</i> SPSS PARA MRL DA HPGR 3PR7. ....                             | 59 |
| FIGURA 38 – CORRELAÇÃO DA ROTAÇÃO DO ROLO PREVISTA X ROTAÇÃO REAL. ....   | 62 |
| FIGURA 39 – SÉRIE TEMPORAL DA ROTAÇÃO DO ROLO PREVISTA X ROTAÇÃO REAL. ....                                     | 62 |
| FIGURA 40 – ROTAÇÃO MÍNIMA FIXA X MODELAGEM. ....   | 65 |
| FIGURA 41 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM BRITADOR DE MANDÍBULAS E SEUS COMPONENTES. ....                           | 75 |
| FIGURA 42 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM BRITADOR GIRATÓRIO. ....  | 76 |
| FIGURA 43 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM BRITADOR DE IMPACTO. ....   | 76 |
| FIGURA 44 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM BRITADOR DE IMPACTO VERTICAL. ....  | 77 |
| FIGURA 45 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM BRITADOR CÔNICO HIDRÁULICO. ....  | 78 |
| FIGURA 46 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM BRITADOR DE ROLOS. ....   | 78 |
| FIGURA 47 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM BRITADOR DE ROLO DENTADO. ....  | 79 |
| FIGURA 48 – MINA DE MINÉRIO DE FERRO. ....  | 84 |
| FIGURA 49 – METASSOMÁTICOS. ....  | 86 |
| FIGURA 50 – SUPERGÊNICOS. ....  | 87 |
| FIGURA 51 – LOCALIZAÇÃO DA PELOTIZAÇÃO NA CADEIA DO MINÉRIO DE FERRO. ....                                      | 88 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 52 – ETAPAS TÍPICAS QUE COMPÕEM O PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO.....     | 89  |
| FIGURA 53 – PÁTIOS DE FINOS E RECUPERADORAS DE MINÉRIO DE FERRO. ....                         | 90  |
| FIGURA 54 – MOINHOS DE BOLAS EM UMA USINA DE PELOTIZAÇÃO.....                                 | 91  |
| FIGURA 55 – FLUXO DE MINÉRIO DE FERRO NA ETAPA DE MOAGEM E CLASSIFICAÇÃO.....                 | 92  |
| FIGURA 56 – ESPESSADOR E FASES DO ESPESAMENTO: CLARIFICAÇÃO, SEDIMENTAÇÃO E COMPACTAÇÃO. .... | 93  |
| FIGURA 57 – FILTRO DE DISCO ROTATIVO A VÁCUO.....   | 94  |
| FIGURA 58 – FILTROS DE DISCO ROTATIVO A VÁCUO E FORMAÇÃO DE TORTA NO ELEMENTO FILTRANTE. .... | 95  |
| FIGURA 59 – AGLOMERAÇÃO DE PARTÍCULAS NA PRESENÇA DE ÁGUA.....                                | 97  |
| FIGURA 60 – EXEMPLO DE DISCO DE PELOTAMENTO.....  | 98  |
| FIGURA 61 – EXEMPLO DE TAMBOR DE PELOTAMENTO. ....  | 99  |
| FIGURA 62 – CLASSIFICAÇÃO DE PELOTAS POR PENEIRAS DE ROLOS. ....                              | 100 |
| FIGURA 63 – FORNO DE GRELHA MÓVEL – GM, CORTE TRANSVERSAL DO LEITO DE PELOTAS.....            | 101 |
| FIGURA 64 – ESQUEMÁTICO DE UM FORNO DE GRELHA MÓVEL E SUAS DIVISÕES EM ZONAS. ....            | 102 |
| FIGURA 65 – CICLO TÉRMICO TÍPICO DAS PELOTAS EM UM FORNO DE GRELHA MÓVEL.....                 | 103 |
| FIGURA 66 – EXEMPLO DE PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO USADO NO CONTROLE AMBIENTAL. ....           | 104 |
| FIGURA 67 – PELOTAS ESTOCADAS NO PÁTIO AGUARDANDO O ENVIO PARA O CLIENTE. ....                | 106 |
| FIGURA 68 – PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO: PRODUTO FINAL DA PELOTIZAÇÃO.....                    | 106 |

## **Lista de Tabelas**

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1 - DADOS NOMINAIS DA HPGR. ....                     | 40 |
| TABELA 2 - RESULTADOS DOS TESTES OPERACIONAIS NA HPGR. .... | 55 |
| TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DOS ESTÁGIOS DE BRITAGEM .....     | 74 |

## Lista de Abreviaturas

**ISRM** - INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS

**DWT** - DROP WHEIGT TEST

**CLP** - COMPRESSÃO DE LEITO DE PARTÍCULAS

**HPGR** - HIGH PRESSURE GRIDING ROLLS

**O/S** - OVERSIZE (MATERIAL RETIDO NA PENEIRA)

**U/S** - UNDERSIZE (MATERIAL PASSANTE NA PENEIRA)

**INT** - PRODUTO INTERMEDIÁRIO (PASSANTE NA PRIMEIRA TELA DA PENEIRA, PORÉM RETIDO NA SEGUNDA)

**O/F** - OVERFLOW

**U/F** - UNDEFFLOW

**Top Size** - DIMENSÃO DA MAIOR PARTÍCULA

**DD** - DUPLO DECK

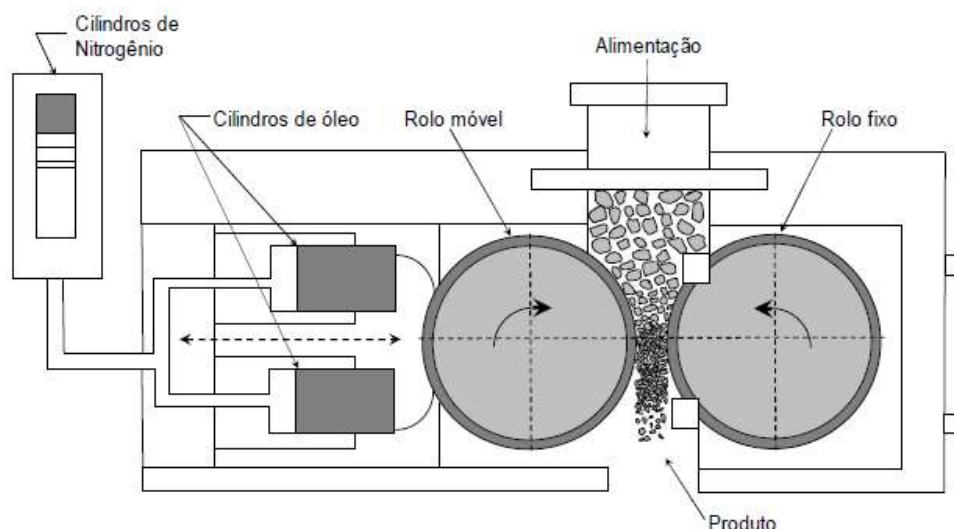
# 1. Introdução

A demanda por minérios em todo mundo é crescente em função do ciclo de expansão da economia mundial, mesmo considerando que o ano de 2009 foi um ano de correção ou retração dos preços das principais *commodities* minerais. O referido ciclo é puxado em grande parte pelo poder econômico dos países emergentes, dos quais se destacam a China, a Índia e o nosso Brasil.

Depósitos minerais pobres requerem muitas etapas de fragmentação e concentração, o que acarreta aumento dos custos de implantação e operação da planta, assim, a cominuição, por ser a etapa mais cara do beneficiamento de minérios, torna-se um campo altamente atrativo para novas tecnologias que se propõem a reduzir custos.

Cominuição, palavra derivada do latim *comminuere*, que significa fazer menor, é o conjunto de redução de tamanhos de partículas minerais, executado de maneira controlada e de modo a cumprir um objetivo pré-determinado. Isto inclui as exigências de controlar o tamanho máximo dos produtos e de evitar a geração de quantidades excessivas de finos. (CHAVES & PERES, 2003).

A Prensa de Rolos de Alta Pressão, *High Pressure Grinding Rolls* (HPGR), é um equipamento utilizado para cominuir materiais. O seu princípio de funcionamento, apresentado na Figura 1, ocorre através da aplicação de pressão a um leito de material por um par de rolos que giram em sentido contrário, montados em um quadro rígido. Um rolo é fixo e o outro se desloca sobre guias, sendo posicionado por cilindros hidráulicos.



**Figura 1** – Princípio de funcionamento de uma HPGR e compressão do leito de partículas

Fonte: Valery and Jankovic, 2013



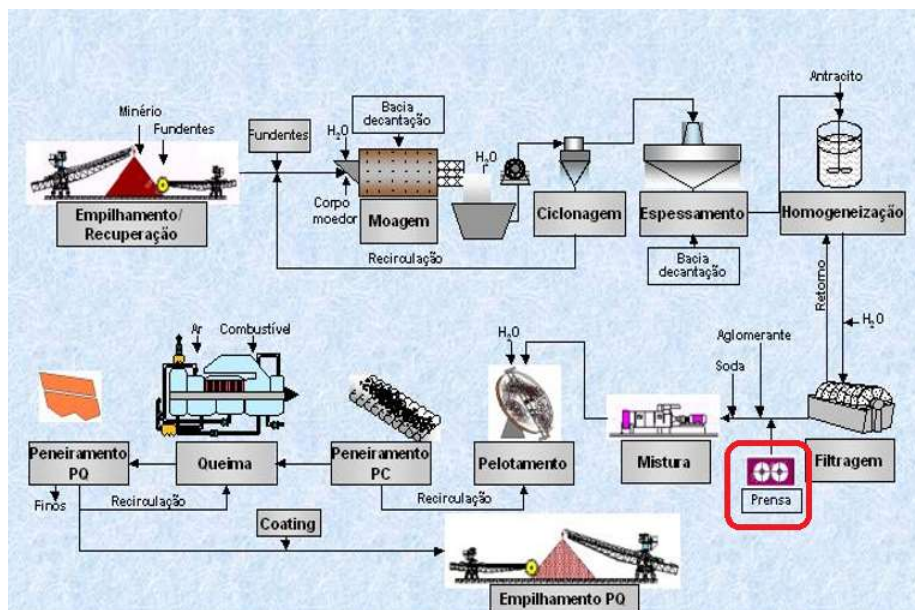
As HPGR são hoje, do ponto de vista energético, os mais eficientes equipamentos de cominuição. Outros equipamentos de cominuição são apresentados no Anexo 1.

De acordo com Morley (2006b), os circuitos de cominuição nos quais a HPGR pode ser utilizada são agrupados em quatro principais grupos, cujos objetivos são:

- Aumentar a eficiência energética;
- Elevar a capacidade do circuito;
- Melhorar o desempenho metalúrgico;
- Atingir uma cominuição seletiva.

O objetivo deste trabalho é a definição de solução das limitações operacionais no sistema de controle de uma HPGR utilizando a Modelagem por Regressão Linear.

Essa HPGR está instalada em uma Planta de Pelotização de minério de ferro localizada em Vitória, ES. A HPGR é destacada no processo de Pelotização e apresentada na Figura 2.



**Figura 2** – HPGR e etapas típicas que compõem o processo de pelotização de minério de ferro.

Fonte: Vale, Introdução a Pelotização de Minério de Ferro, Treinamento Interno, 2010

O processo de Pelotização é detalhado no Anexo 3.

Para identificação das causas dessas limitações e quantificar as influências das variáveis de processo, foram realizados testes em 13 cenários operacionais no próprio equipamento por equipe multidisciplinar. Os ganhos obtidos representam melhor qualidade da pelota, maior produtividade e redução do consumo energético nos moinhos e melhor uniformidade das pelotas pela redução de carga circulante no pelotamento.

## 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura técnica, compreendendo aspectos sobre métodos específicos de redução de tamanho de partículas através da compressão, impacto e abrasão, cominuição e as suas leis de cominuição, em que as Equações de Kick, Rittinger e Bond fornecem estimativas preliminares para cálculo de energia necessária às etapas de britagem, moagem e moagem fina, respectivamente, bem como uma apresentação da Prensa de Rolos de Alta Pressão - *High Pressure Grinding Rolls*.

### 2.1 Cominuição

Partículas de rochas são formadas por minerais que apresentam estruturas cristalinas específicas (LUZ et al., 2002). Para serem fraturadas, é necessário que elas sejam submetidas a uma força que exceda seu limite de ruptura (BERALDO, 1987).

Diversos fatores contribuem para a fragmentação de uma partícula e, portanto, o resultado nunca é previsto com exatidão. Entretanto, a probabilidade de quebra está relacionada à quantidade de energia que é absorvida durante a sollicitação. Após certo valor, conhecido como energia de quebra da partícula, ela se rompe. Esse limite é intrínseco ao material, além de depender do tamanho, da morfologia, da estrutura e da intensidade/direção da força (KING, 2001).

Mesmo para partículas do mesmo material e com as mesmas propriedades, energias de quebra diferentes são observadas. Essa característica comprova a teoria descrita por Griffith, de que a quebra ocorre, preferencialmente, pela presença de falhas, que foram geradas durante a gênese mineral (KING, 2001).

### 2.2 Abrasão, Compressão e Impacto

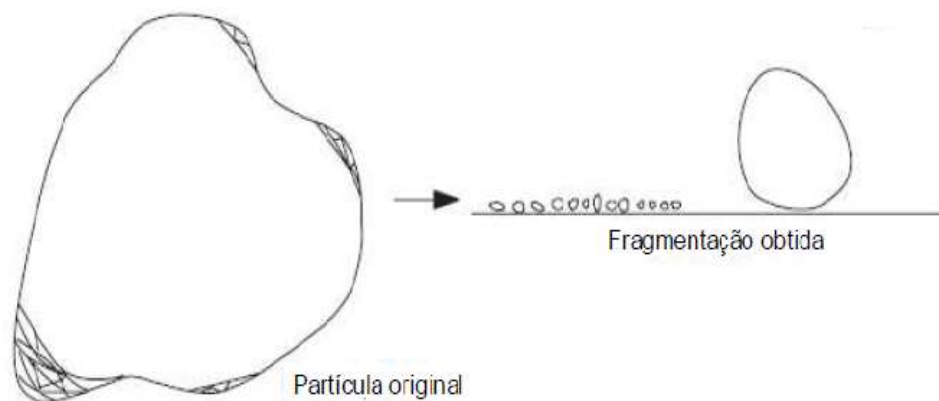
A cominuição consiste de métodos específicos para redução de tamanho de partículas através de atrito da superfície de partículas do minério com a superfície dos corpos moedores (abrasão), da aplicação de pressão (compressão), ou criação de impacto cinético entre minério e corpo moedor (impacto), (OUTOKUMPU, 2002).

### 2.2.1 Abrasão

A abrasão é o resultado de esforços de cisalhamento na superfície e de uma força normal na superfície da partícula insuficiente para que haja ruptura. Como consequência, há apenas a fragmentação superficial da partícula. A distribuição granulométrica típica apresenta dois picos (excesso de finos e de partículas com tamanhos próximos aos da original) bem separados por faixas granulométricas que não apresentam partículas (KING, 2001).

É um processo com alto consumo de energia, (PEREIRA, 1989).

A Figura 3 apresenta a fragmentação obtida para esse mecanismo.



**Figura 3** - Mecanismo de fragmentação por abrasão.

Fonte: Modificado de King, 2001.

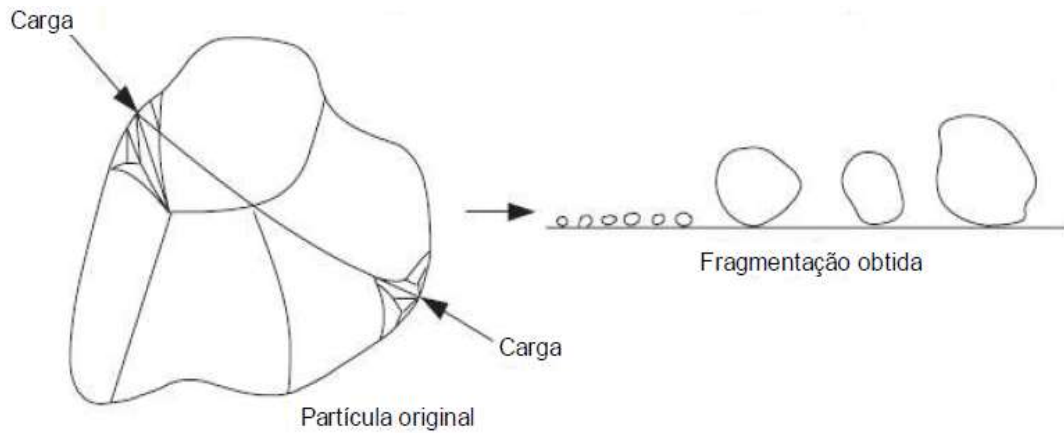
### 2.2.2 Compressão

A principal característica da fragmentação obtida por meio da compressão é uma distribuição granulométrica bimodal (KING, 2001 e WILLS e NAPPIER-MUNN, 2006), com quantidade significativa de finos gerada na zona de compressão e com partículas maiores resultantes da quebra por tração indireta (em função da compressão diametral).

No mecanismo de compressão, a aplicação da força é normal à superfície da partícula e lenta (em comparação à quebra por impacto), o que permite que, com o surgimento da primeira fratura, o esforço seja aliviado (BERALDO, 1987).

Esse tipo de fratura é o que ocorre em britadores e produz poucos fragmentos de grande diâmetro. Nos moinhos, está associado à compressão das partículas entre corpos moedores ou à compressão entre as partículas em HPGR.

A Figura 4 ilustra a fragmentação obtida para esse mecanismo.



**Figura 4** - Mecanismo de fragmentação por compressão.

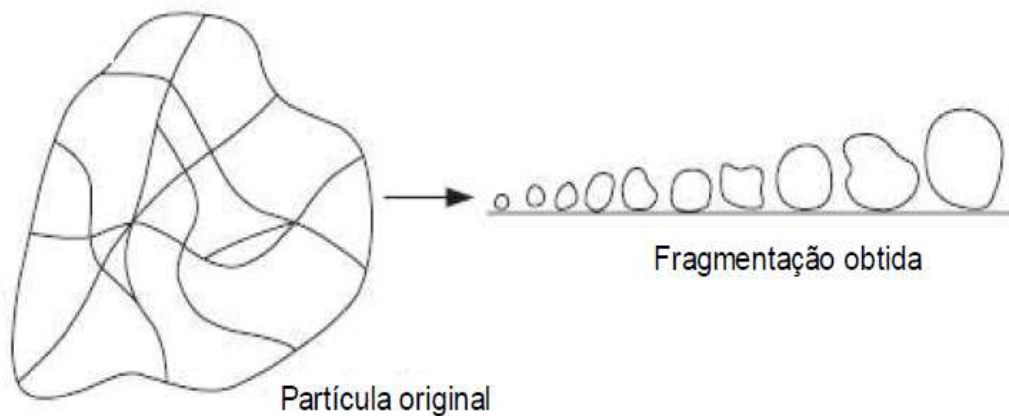
Fonte: Modificado de King, 2001.

### 2.2.3 Impacto

A fragmentação por impacto é obtida por meio da rápida aplicação de uma força de compressão, cuja intensidade é muito superior à resistência da partícula (BERALDO, 1987). Diversos tamanhos de partícula são obtidos por esse mecanismo e, uma vez que uma alta energia é aplicada, o processo de quebra não é seletivo.

É o tipo de fratura que acontece nos britadores de impacto e moinhos na zona de queda das bolas, e gera distribuição granulométrica fina.

A Figura 5 ilustra fragmentação obtida para esse mecanismo.



**Figura 5** - Mecanismo de fragmentação por impacto.

Fonte: Modificado de King, 2001.

### **2.3 Processos de Cominuição**

Segundo Pereira (1989), os processos de cominuição visam, no tratamento de minérios, gerar uma granulometria adequada para processos subsequentes, sejam eles processos de classificação ou moagem posterior ou produzir uma liberação física adequada do minério valioso ou produtos finais acabados.

Os processos de cominuição podem ser feitos a seco ou via úmida, dependendo de alguns fatores técnicos e econômicos. Por exemplo, um minério com umidade alta deve ser moído a úmido, pois o custo para secagem seria proibitivo. Já um minério extraído de uma região desértica ou muito seca, moído a seco, poderá apresentar vantagens econômicas substanciais.

O desafio para desenvolver um circuito de cominuição é selecionar condições para aumentar a probabilidade de quebra de partículas de determinado tamanho para gerar produtos no tamanho desejado, com o menor consumo energético possível.

A seleção de um circuito de cominuição correto depende da distribuição granulométrica da alimentação do produto e de outras propriedades físicas que definem a dureza, competência e abrasividade do minério. Estas propriedades variam muito de minério para minério e podem ter variações dentro de diferentes partes da mesma reserva mineral.

Os custos são um fator muito importante. Custos de investimento e custos operacionais, junto com a disponibilidade esperada de produção e a vida útil do equipamento, definem o custo específico da redução de tamanho. O método de redução ótimo irá variar significativamente de um minério para outro. Consequentemente, para um balanceamento efetivo dos custos de investimento e operacionais, é necessário um entendimento prático de como utilizar eficientemente a energia disponível e desta forma dimensionar o melhor circuito de cominuição para sua utilização eficiente durante a vida da mina (Outokumpu II, 2002).

### **2.4 “Leis” da Cominuição**

As chamadas “leis” da cominuição relacionam o consumo específico de energia com a granulometria da alimentação e do produto do circuito (WILLS e NAPPIER-MUNN, 2006). O interesse nesta associação se deu em função dos elevados custos nos processos de cominuição (BERALDO, 1987). Entretanto, nenhuma delas é completamente satisfatória, pois a ineficiência dos processos cominutivos é elevada, ou seja, apenas uma pequena parcela da

energia total é disponível para a quebra das partículas, enquanto o restante é absorvido pelos próprios equipamentos (WILLS e ATKINSON, 1993).

Portanto, por mais úteis que sejam, considerando a complexidade do problema, ainda não formularam uma teoria geral satisfatória, com aplicação prática.

Uma relação que permita calcular a energia necessária à cominuição de um material até certo tamanho é uma aspiração antiga de cientistas e técnicos, pois, sendo o gasto de energia na cominuição o que mais onera uma instalação industrial, é de grande valia a sua determinação.

Segundo Sampaio e Delboni Júnior (2007), em função do impacto em aspectos econômicos e ambientais, o desempenho de processos de cominuição é objeto de estudos sistemáticos há cerca de 150 anos.

O estabelecimento das assim chamadas “leis” de cominuição é praticamente contemporâneo às primeiras patentes de equipamentos de britagem. Os debates acalorados entre Rittinger e Kick demonstravam, sobretudo, as dificuldades de se parametrizar, de maneira abrangente e relativamente simples, a energia associada a eventos de cominuição.

A equação empírica (Equação 1) relaciona a energia consumida ao inverso da variação de diâmetro dos produtos elevado a uma função-potência (BERALDO, 1987).

$$dE = -K \frac{dx}{x^n}$$

Equação 1

Onde:

E = Energia aplicada (kWh/t)

x = Diâmetro da partícula (mm)

K = Constantes dependentes do material (kWh/t)

n = Constantes dependentes do processo cominutivo (adimensional)

Diversos pesquisadores realizaram diferentes interpretações dessa relação, que integrada dá origem a outras equações (BERALDO, 1987):

Para  $n \neq 1$ , tem-se a Equação de Charles (1957):

$$E = K_1 [x_f^{-n+1} - x_i^{-n+1}]$$

Equação 2

Para  $n = 2$ , tem-se a Lei de Rittinger (1857):

$$E = K_2 \left( \frac{1}{x_f} - \frac{1}{x_i} \right)$$

Equação 3

Para  $n = 1$ , tem-se a Lei de Kick (1883):

$$E = K_3 \ln \left( \frac{x_i}{x_f} \right)$$

Equação 4

Para  $n = 1,5$ , tem-se a Lei de Bond (1952):

$$E = K_4 \left( \frac{1}{x_f^{0,5}} - \frac{1}{x_i^{0,5}} \right)$$

Equação 5

A primeira lei da cominuição, proposta por P. Ritter Von Rittinger (Equação 3), estabelece que a energia consumida é proporcional à área nova gerada na fragmentação, que é inversamente proporcional ao diâmetro da partícula.

A segunda lei (Equação 4), proposta por Kick, determina que a energia consumida é proporcional à redução do volume da partícula.

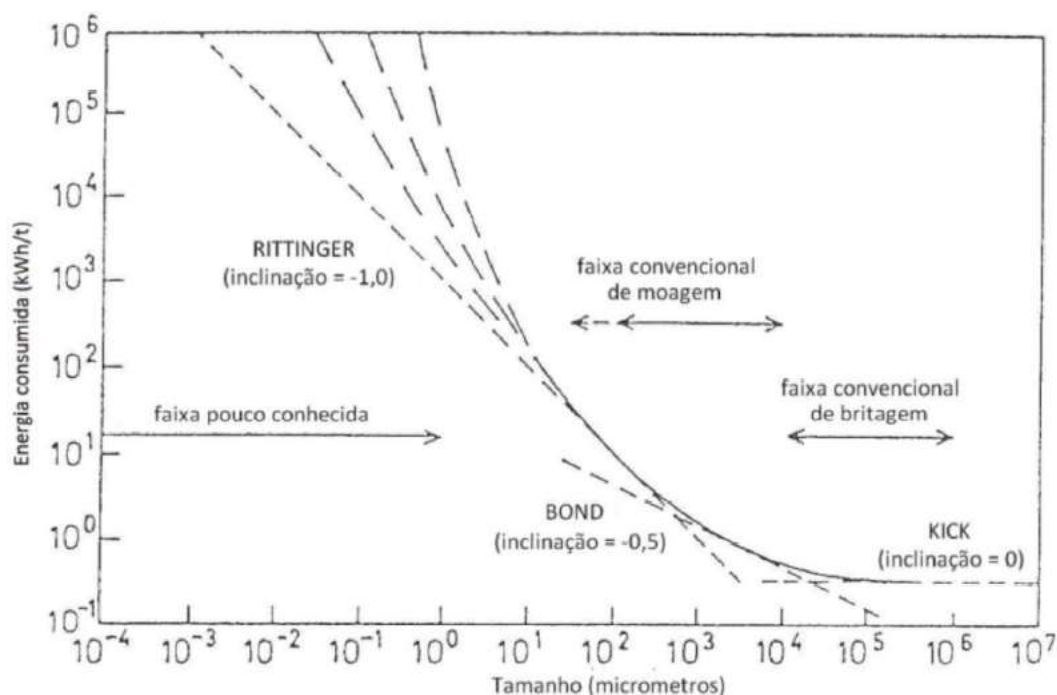
Durante muito tempo, o estudo da relação entre a energia consumida e a redução de tamanhos resultou em controvérsias entre os dois cientistas e seus diversos seguidores. Os pesquisadores colocavam-se ao lado de um ou outro, de acordo com os resultados obtidos nos seus próprios trabalhos experimentais. Esta controvérsia estava associada ao seguinte paradoxo: teoricamente os materiais deveriam ser mais duros do que são na prática, entretanto, na prática se utiliza muito mais energia para a fragmentação do que a calculada teoricamente. Na realidade, os diversos pesquisadores interpretaram os postulados de Rittinger e de Kick de formas diferentes.

Como os postulados de Rittinger e Kick não satisfaziam a todos os casos encontrados na prática e como se necessitava, na indústria, de algumas regras para classificar os materiais segundo as respostas à cominuição, F.C. Bond propôs a terceira lei da cominuição (Equação 5)

com base em uma intensa campanha de comparação entre ensaios laboratoriais e consumo energético em escala industrial e piloto.

A Figura 6 apresenta a relação entre o consumo de energia e a granulometria do produto, proposta em 1961 por Hukki (HUKKI, 1961). A partir disso, foi possível verificar que as três leis seriam aplicáveis em intervalos granulométricos específicos.

Assim, a lei de Kick se aplicaria à britagem, a de Bond à moagem e a de Rittinger à de moagem superfina.



**Figura 6** - Relação entre energia e tamanho da partícula na cominuição.

Fonte: Modificado de Hukki, 1961

Ainda hoje, as leis de Kick, Rittinger e Bond fornecem boas estimativas preliminares para cálculo de energia necessária às etapas de britagem, moagem e moagem fina, respectivamente. Os três pesquisadores criaram assim modelos empíricos, no melhor sentido do termo, ou seja, resultam de criterioso aprendizado tendo por base a extensiva observação de eventos individuais e coletivos de cominuição de minérios.



## 2.5 Prensa de Rolos de Alta Pressão - High Pressure Grinding Rolls

### 2.5.1 Histórico

O desenvolvimento da HPGR iniciou-se após os estudos do prof. Klaus Schönert sobre a compressão de partículas individuais e a de camadas de partículas. Os resultados mostraram que o consumo de energia foi reduzido pela metade nas etapas posteriores à da britagem na HPGR (SCHÖNERT, 1988).

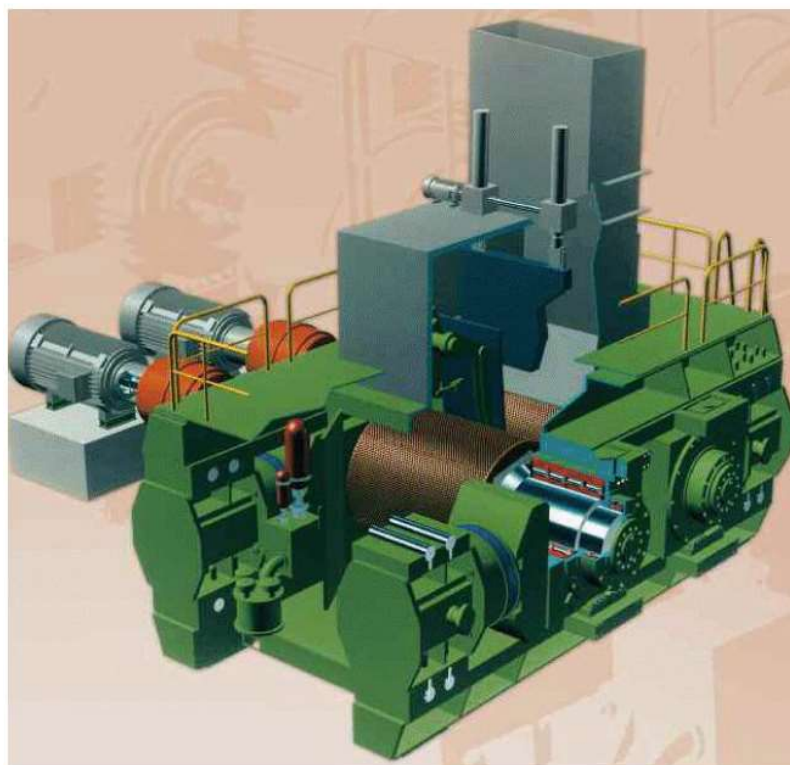
Schönert, em seu estudo fundamental sobre processos de cominuição, postulou que em qualquer processo de cominuição, as partículas são quebradas por forças de contato, que deformam a partícula e criam um campo de tensão. O nível de estresse resultará na deformação inelástica ou quebra das partículas. O número de pontos de contato depende do modo de aplicação do estresse, se em uma partícula de cada vez ou simultaneamente em um leito de partículas (SCHÖNERT, 1988).

Schönert afirma que os equipamentos de cominuição, tais como os britadores apresentados no Anexo 1, os moinhos apresentados no Anexo 3, e HPGR, estressam os materiais ou por tensão de compressão ou por tensão de tração. Tanto a quebra de partículas isoladas quanto a quebra em leitos de partículas foram testadas em sua pesquisa fundamental.

Quando um leito de partículas é comprimido e cominuído, o resultado é tal que o material é cominuído de uma forma mais eficiente do que em um moinho de bolas. Schönert concluiu que a razão para este fato está no transporte controlado promovido pela compressão das prensas de rolos resultando em uma grande proporção de energia disponível usada única e exclusivamente para estressar o material. Em moinhos de bolas, o transporte de material dentro do volume ativo do moinho e entre os corpos moedores e as diversas zonas de compressão ocorre aleatoriamente. Isso frequentemente leva as partículas a se moverem para fora das zonas de estresse resultando em colisões improdutivas entre os corpos moedores e entre estes e o revestimento interno do moinho. Este modo de utilização de energia é bastante dispersivo devido à sua natureza probabilística.

Para aplicações práticas do princípio de cominuição eficiente por compressão de leitos de partículas, Schönert sugeriu o uso de dois rolos montados em uma estrutura bastante rígida e alimentados de forma que um leito de partículas se forme entre os rolos sob alta pressão (> 50 MPa).

Os fabricantes KHD, Krupp Polysius e Köppern obtiveram os direitos de patente de Schönert e desenvolveram a ideia baseados em tecnologias existentes. Isto resultou na versão das prensas de rolos atuais, como mostrado na Figura 7.



**Figura 7** – Representação esquemática de uma prensa de rolos moderna

Fonte: KHD\_ROLLER\_PRESS\_April\_2012.pdf de <http://www.khd.com/roller-presses.html>.

A HPGR foi rapidamente implantada, em meados dos anos de 1980, em circuitos industriais para processar materiais mais brandos encontrados na indústria cimenteira, em que reduções de custos foram atingidas em razão da economia de energia, do aumento da capacidade do circuito e da longa vida útil das superfícies dos rolos. Entretanto só foi aplicada em materiais mais competentes que justificassem os altos custos de manutenção dos rolos, como em rochas diamantíferas, pois preservava a gema devido à fratura preferencial nos interstícios das partículas (SAMPAIO e DELBONI JÚNIOR, 2007).

As aplicações da HPGR no processamento de minérios mais competentes e abrasivos tornaram-se viáveis após a introdução, a partir da década de 1990, de novas tecnologias na confecção da superfície dos rolos. A principal inovação foi a adição de pinos de alta resistência à superfície dos rolos. Essa alteração permite que uma camada autógena formada pelo próprio material, proteja os rolos (SCHUMACHER e THEISEN, 1997) e que os custos de manutenção

sejam reduzidos. Em 1994 a prensa de rolos começou a traçar o seu caminho na indústria de minério de ferro, tornando-se difundida em seu processamento, especialmente na preparação do *pellet feed*.

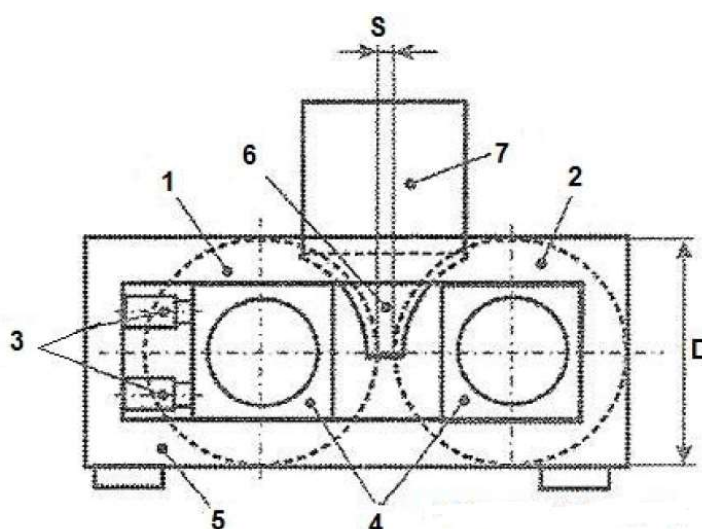
Desde então, a prensa de rolos tem sido progressivamente aplicada a materiais considerados duros e abrasivos. As aplicações para a prensa de rolos nas atividades de mineração que mais se destacam são substituição de etapas de britagem/pré-moagem, substituição da moagem AG/SAG e na etapa complementar para gerar superfície na pelotização.

Normalmente, o motivo mandatório para a aplicação da HPGR como alternativa aos circuitos convencionais (britagem e moagem) é o aumento da eficiência energética.

### 2.5.2 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento da HPGR ocorre através da aplicação de pressão a um leito de material por um par de rolos que giram em sentido contrário, montados em um quadro rígido. Um rolo é fixo e o outro se desloca sobre guias, sendo posicionado por cilindros hidráulicos. Essas pressões aplicadas podem extrapolar 250 Mpa, dependendo do tamanho da máquina.

A Figura 8 ilustra a HPGR: O GAP ( $S$ ) formado entre o rolo móvel (1) e o rolo fixo (2), o diâmetro dos rolos ( $D$ ) e o comprimento dos rolos ( $C$ ).



**Figura 8** – Funcionamento da prensa de rolos de alta pressão.

Fonte: Pyke et al, 2006.

A força total (F), responsável por mover o rolo, empurrando-o contra o leito de material, pode ser ajustada através de um sistema hidráulico (3) equipado com dois ou quatro pistões.

A Equação 6 introduz a força específica (P) da moagem que é definida pela força aplicada (F) a uma determinada área (comprimento (C) x diâmetro dos rolos (D)).

$$P = \frac{F}{C \times D}$$

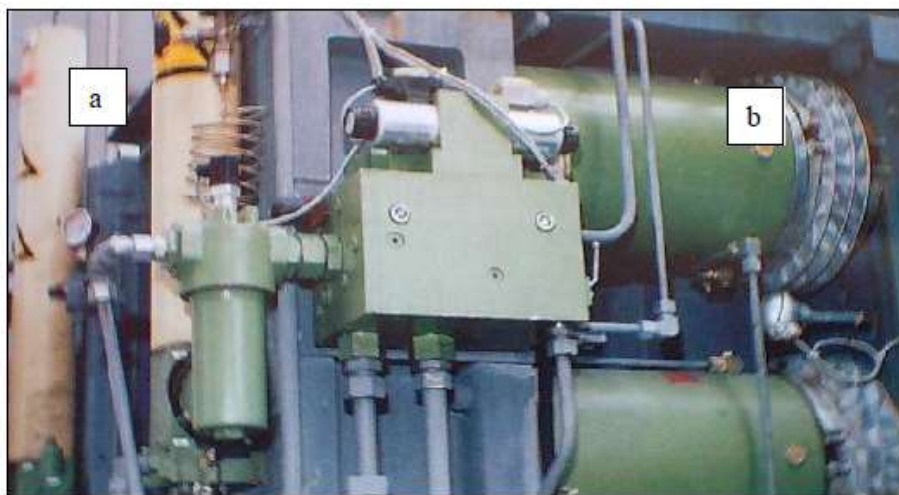
Equação 6

Os rolos são suportados por mancais compactos (4) e a pressão que atua sobre o leito do material fica confinada em uma estrutura robusta (5). A área de pressão é selada na lateral do rolo por placas de desgaste de aço responsáveis por conter o minério nas bordas dos rolos (6). O silo de alimentação (7) é representado no topo do equipamento.

Como comparação, os britadores de rolos convencionais operam com velocidades periféricas dos rolos maiores que as utilizadas nas HPGR, e a alimentação dos rolos é restrita, sendo que cada partícula é cominuída sem influência de outras partículas. Dentro da zona de britagem de um britador de rolos convencional existem espaços vazios, grandes o bastante, permitindo que partículas cominuídas se movam para dentro destes espaços com moagem interpartículas muito limitada.

Por outro lado, as HPGR são alimentadas por gravidade, causando a formação de um leito de partículas entre os rolos. Este leito de partículas confinado atua como uma alavanca gerando uma forte resistência à rotação. A alta energia dos motores é capaz de gerar torque suficiente para superar esta resistência e forçar a passagem do material entre os rolos. À medida que o leito confinado se move entre os rolos, a pressão no leito aumenta e as partículas são moídas por compressão interpartículas sob alta pressão (OTTE, 1988). O conceito de quebra interpartículas refere-se a um processo de cominuição autógeno, em que partículas estão sendo quebradas por compressão com outras partículas dentro de um leito de compressão confinado.

A diferença óbvia entre britadores de rolos convencionais e a HPGR é a existência de um sistema hidráulico nas HPGR, apresentado na Figura 9:



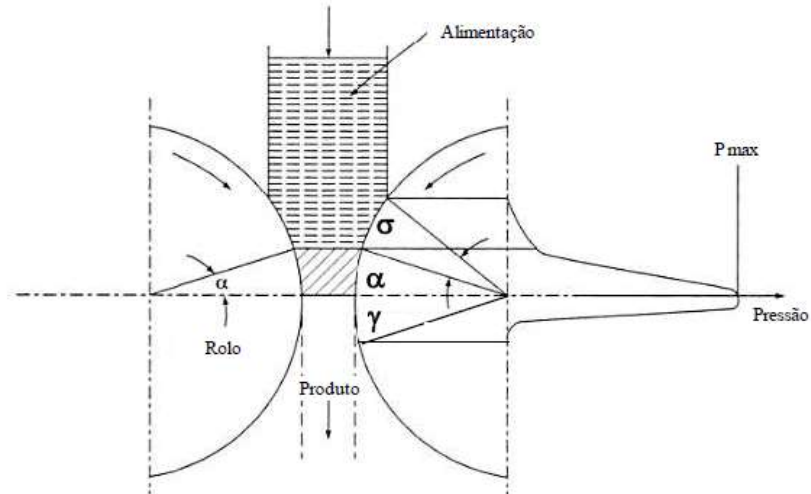
**Figura 9** – Acumuladores de nitrogênio (a) e pistões hidráulicos (b)

Fonte: Cortesia Krupp-Polysius.

O sistema hidráulico permite variações na posição relativa dos rolos durante a operação em alta compressão, enquanto nos britadores de rolos convencionais apenas a distância mínima entre rolos é fixa e pré-determinada. Estes modos de operação completamente distintos afetam significativamente a forma como a energia é transferida para as partículas, resultando em uma distribuição completamente irregular no tamanho das partículas nos produtos.

O processo de cominuição inicia-se com o intertravamento das partículas na zona demarcada pelo ângulo de intertravamento  $\sigma$ , e é finalizado na zona de compressão máxima, delimitada pelo ângulo de compressão  $\alpha$ . Após a compressão máxima, o produto sofre uma pequena força normal que é consequência de sua expansão, uma vez que há um alívio na pressão exercida pela HPGR. Nessa região não demarcada pelo ângulo de alívio  $\gamma$ , não há mais cominuição. Esses ângulos são calculados pelas equações apresentadas no Anexo 2.

A geometria dessas regiões e as pressões exercidas na camada de partículas, ilustradas na Figura 10, variam para cada configuração de circuito e para cada minério.



**Figura 10** – Esquema simplificado da zona de intertravamento e de compressão.

Fonte: Modificado de Neumann, 2006.

### 2.5.3 Componentes da HPGR

Conforme já citado anteriormente, a HPGR é constituída basicamente por dois rolos paralelos que giram em sentido contrário, sendo que um é fixo à estrutura do equipamento e o outro é móvel e desloca-se sobre um trilho, dependendo da pressão solicitada pelo minério nos atuadores hidráulicos (MORLEY, 2006a). A alimentação é feita na vertical sobre a abertura entre os rolos.

A Figura 11 apresenta duas ilustrações de HPGR:



**Figura 11** – Exemplos de HPGR: a esquerda a FLSmidth A/S e a direita a Metso.

Fonte: Brian, Herman e Whalen, 2015

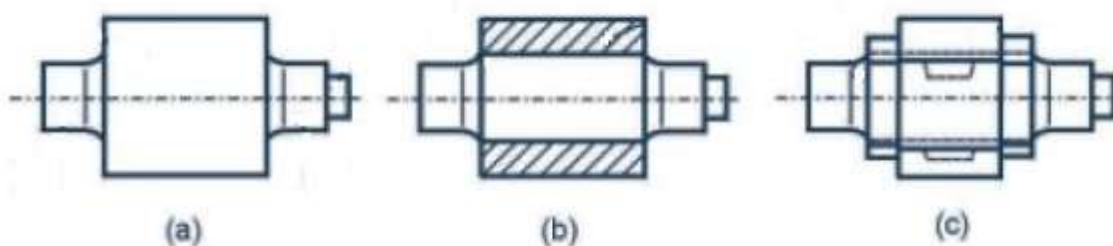
Os rolos são movidos por motores independentes e conectados a estes por redutores e podem operar a uma velocidade fixa ou variável, dependendo da demanda do trabalho. Usualmente, a superfície dos rolos é protegida por pinos de carbeto de tungstênio, que ajudam a formar uma camada autógena de proteção.

Entretanto, o rolo pode ser liso ou protegido por uma camada de metal de maior resistência (KLYMOWSKY et al., 2006).

Apesar de suas grandes dimensões, é necessária uma fundação menor em comparação aos circuitos convencionais de britagem, pois a vibração durante a operação torna-se reduzida (KLYMOWSKY et al., 2006).

### 2.5.3.1 Tipos de Rolos e Revestimentos

Existem diferentes tipos de rolos para a HPGR, conforme Figura 12. A maioria dos equipamentos utilizados na indústria de cimento possui rolos inteiriços (Figura 12a). Esse tipo de rolo é feito de aço soldável e são forjados em sua forma final, com o intuito de obter boas propriedades mecânicas. Diferentes tipos de ligas são utilizados como revestimento extra para prover melhor proteção ao desgaste. O remodelamento dos rolos inteiriços é uma prática bastante usual, que, realizada através de uma simples resoldagem na superfície, permite que o rolo seja remodelado diversas vezes antes de ser substituído.



**Figura 12** – Tipos de rolos - a) Inteiriços, b) anel, c) segmentados.

Fonte: Broeckmann e Gardula, 2005

Uma desvantagem dos rolos sólidos ou inteiriços é o fato de todo o componente ser uma parte suscetível ao desgaste, assim todo o rolo precisa ser trocado por inteiro após certo número de remodelamentos, em função da fadiga do material.

Para contrapor essa deficiência, os rolos do tipo anel, compostos pelo conjunto eixo-rolo foram introduzidos (Figura 12b). Dessa forma, quando ocorrer o desgaste, apenas o rolo deve ser substituído e não o conjunto inteiro, logo, o eixo pode ser usado por um longo período de tempo.

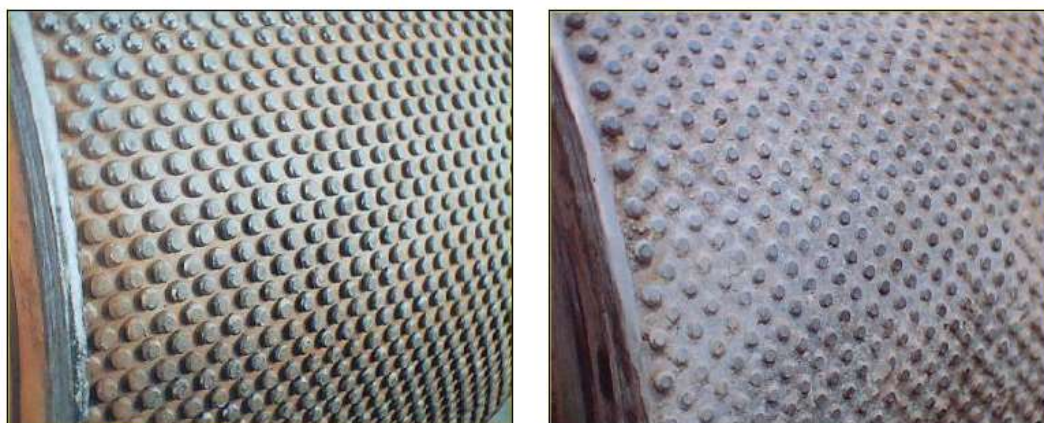
Uma terceira opção são os rolos segmentados, representados na Figura 12c. A concepção deste tipo de rolo é similar ao tipo anel, a diferença é que ao invés da montagem acontecer através de dilatação térmica necessária para ao tipo anel, a fixação para esse tipo ocorre através de segmentos instalados ao longo do rolo.

A principal característica dos rolos segmentados é a objetividade de sua troca, que acontece através da aplicação de pressão para desmontar o rolo do eixo, reduzindo o tempo e a estrutura necessários para esse evento.

Ao longo dos últimos anos, progressos significativos foram obtidos nos revestimentos aplicados na superfície dos rolos. Este ponto tem deixado a aplicação da HPGR bastante atrativa para rochas mais duras e abrasivas.

O desenvolvimento dos pinos de carboneto de tungstênio, conhecidos também como *studs*, foi de fundamental importância e, atualmente, a evolução chegou ao ponto de haver adequação da resistência mecânica dos pinos ao longo do rolo. No centro dos rolos, região de maior desgaste, a resistência mecânica dos *studs* é maior do que nas bordas que possuem menor desgaste em função do fluxo de material estar concentrado no centro e haver alívio da pressão nas bordas dos rolos. A variação na resistência mecânica dos *studs* à medida que se afastam do centro do rolo evita o seu desgaste desigual, côncavo à medida que se afasta das extremidades.

A Figura 13 representa um exemplo de rolo de uma HPGR com detalhe dos *studs* instalados e a camada autógena que se forma entre os *studs*.



**Figura 13** – A superfície de rolo com *studs* e a camada autógena que se forma entre os *studs*

Fonte: Alsman, 1996.



A seguir na Figura 14, os detalhes dos *studs* sobre os rolos:

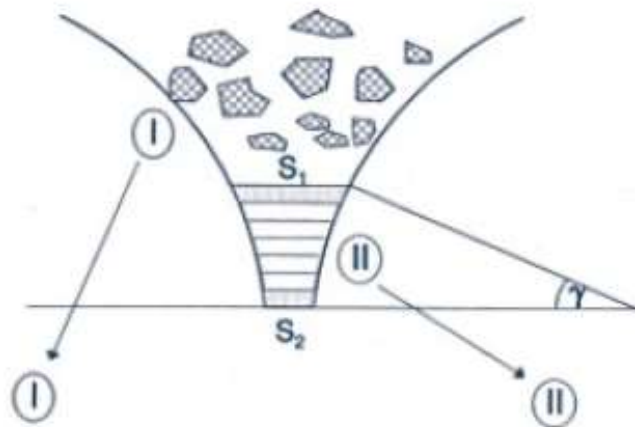


**Figura 14** – Detalhe dos *studs*

Fonte: WEIR Minerals / KHD Humboldt Wedag, 2010.

### 2.5.3.2 Principais Regiões de Desgaste dos Rolos

O desgaste do revestimento acontece de maneira diferente em duas regiões, conforme Figura 15. Na região I, antes do ângulo que delimita o início da cominuição interparticular ou simplesmente ângulo crítico, há incidência do movimento tangencial entre a superfície dos rolos e as partículas do material. Já na região II, após o ângulo crítico, não há incidência de movimento tangencial.



**Figura 15** – Desgaste do revestimento nas diferentes regiões do rolo.

Fonte: Broeckmann e Gardula, 2005

Como consequência das diferentes regiões de desgaste, a superfície dos rolos na região I desgasta pelo cisalhamento do material com a superfície do rolo. Na região II, acontece a fadiga do revestimento causada pela compressão do material contra a superfície dos rolos. Pode-se dizer que quanto mais competente e abrasivo for o minério a ser cominuído, maior o desgaste.

O desgaste do rolo é maximizado quando o espaçamento entre os rolos (*GAP*) é menor do que o *top size* de alimentação da prensa. Neste caso, o mecanismo de quebra das partículas gera desgaste excessivo na região I.

### **2.5.3.3 Fatores que Afetam a Vida Útil do Revestimento**

#### **A) Característica Abrasiva e Composição Mineral**

A taxa de desgaste dos *studs* é, primeiramente, função do índice de abrasividade e da competência do mineral. Já a quebra dos studs ocorre fortemente em função do *top size* do material que alimenta a prensa. (MORLEY, 2006-b)

O índice de abrasão é a medida padrão para definir o grau de abrasividade de um minério. No entanto, esse índice não é considerado um indicador apropriado para definir o revestimento a ser aplicado nos rolos, pois o índice de abrasividade não é 100% relacionável aos princípios de cominuição utilizados pela prensa de rolos (KLYMOWSKY et al, 2006).

Usualmente, cada fabricante desenvolve a sua própria metodologia para identificar o revestimento mais aplicável aos rolos.

#### **B) Tamanho da Partícula, Dureza e Força Específica de Moagem**

A resistência compressiva do minério, em combinação com as partículas de maiores tamanhos presentes na alimentação e a força específica de moagem, vão determinar o nível de danos ao revestimento (MORLEY, 2006-b) e, por conseguinte, sua durabilidade. Quanto maior forem os valores de cada variável citada, maior a probabilidade de ocorrerem danos e desgastes aos rolos. Os danos são potencializados quando as variáveis ocorrerem simultaneamente.

Como regra geral, quanto maior for a força específica de moagem, maior será o desgaste na superfície dos rolos. É certo que as partículas mais largas e mais duras de minério requerem uma força maior para serem fragmentadas, no entanto, é importante que força em demasia não seja aplicada de maneira desnecessária. Segundo Broeckmann e Gardula (2005), a força específica da moagem deve ser limitada a no máximo 4,9 N/mm<sup>2</sup>, em função da natureza frágil dos *studs*. Partículas mais largas geram forças tangenciais contra os *studs*, o que pode acarretar a quebra dos mesmos.

### **C) Umidade**

O revestimento composto por *studs* parte do princípio da proteção autógena, onde o controle correto da umidade do material de alimentação da HPGR é muito importante, pois ajuda a formar uma camada de material entre os *studs*, o que irá reduzir o desgaste do revestimento. Já a umidade em excesso acarreta um alto desgaste na superfície dos rolos, pela remoção da camada autógena.

### **D) Velocidade dos Rolos**

Precauções especiais devem ser direcionadas à velocidade dos rolos. Dunne (2006) relaciona o aumento da velocidade dos rolos com o aumento da turbulência na alimentação, fato causador do escorregamento do material de alimentação contra a superfície dos rolos, que acarreta elevado desgaste do revestimento dos rolos.

### **E) Forças Horizontais Causadas pelo Regime Intermitente da HPGR**

A taxa de desgaste no rolo móvel da prensa é um pouco maior do que a taxa de desgaste do rolo fixo. Tal fato foi detectado em instalações de minério de ferro na década de 90 (MORLEY, 2006-b). Uma explicação para o fenômeno é que uma força cinética horizontal extra é gerada durante o movimento do rolo móvel. A força criada pelo sistema hidráulico cria desgaste adicional ao componente móvel. Embora o movimento horizontal não seja grande (na maioria dos casos compreendido entre de 2 a 6 mm), o desgaste ocorre em função dos picos de pressão adicionais atuantes na superfície do rolo móvel.

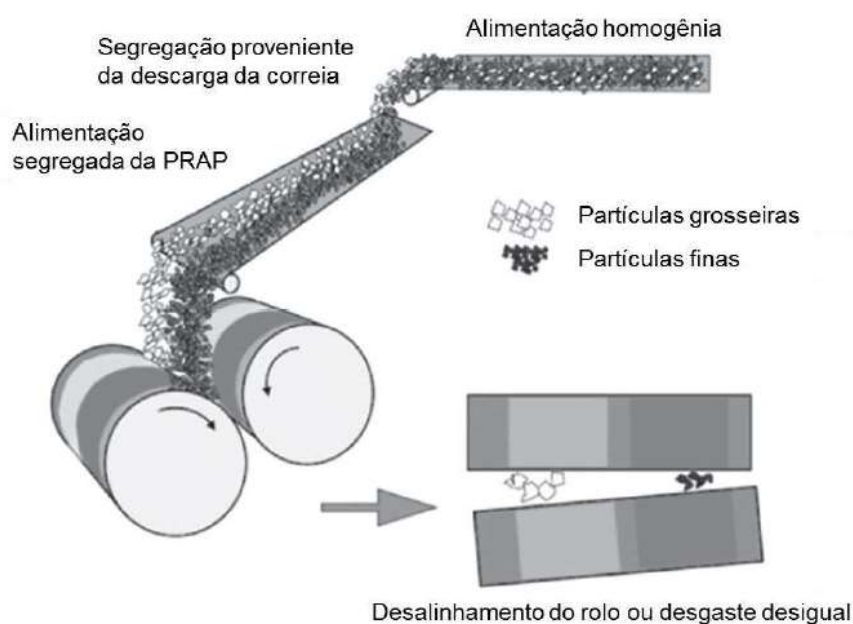
### **F) Extrusão**

Extrusão é o fenômeno no qual o produto emerge da zona de compressão, em função da diferença da velocidade tangencial do rolo e da velocidade do material na sua superfície (MORLEY, 2006-b). A extrusão normalmente aumenta em função do diâmetro do rolo, da pressão aplicada e da umidade da alimentação. É mais notável em rolos com revestimento mais macio e diminui notoriamente nos rolos que possuem *studs* na superfície.

### G) Alimentação do Chute

O chute de alimentação da HPGR não pode limitar o fluxo de material à zona de compressão. Desse modo, a HPGR deve operar sob condições de alimentação afogada e, conseqüentemente, estável, para aumentar a capacidade do equipamento e reduzir o desgaste dos rolos. A HPGR tratada nesse estudo apresenta essa limitação de não formação de coluna por causa da elevada rotação de seus rolos e será melhor detalhada nos capítulos seguintes.

Também a segregação da alimentação influencia negativamente a eficiência do equipamento, uma vez que proporciona diferentes distribuições granulométricas ao longo da largura dos rolos, ou seja, partículas grosseiras alimentadas em um lado e, as finas, no outro, como apresentado na Figura 16. Em outros equipamentos, como britadores cônicos ou de impacto e moinhos, esse efeito não é muito significativo como na HPGR. Isso resulta em desgaste e relação de redução desigual ao longo do rolo, além do desalinhamento do rolo (VAN DER MEER e MAPHOSA, 2012).



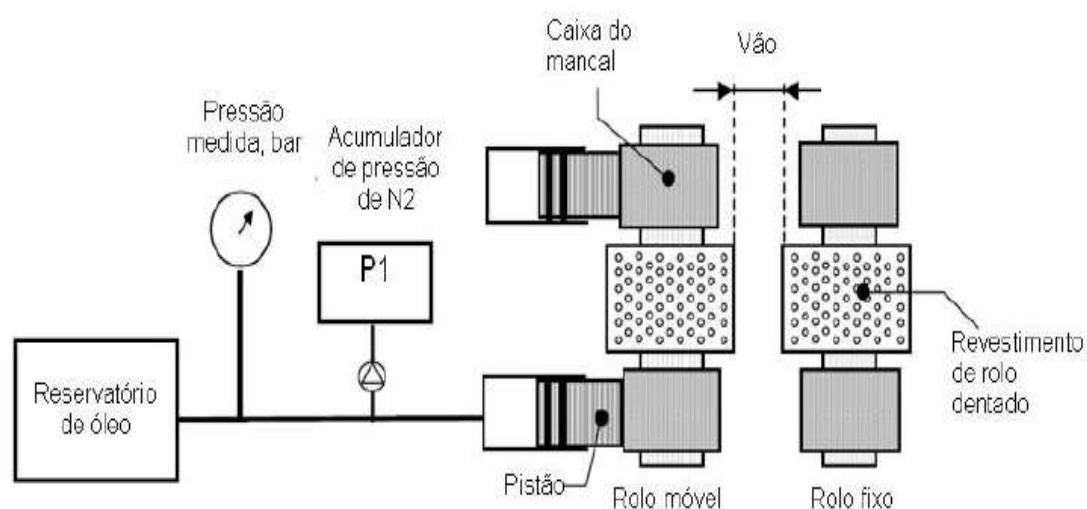
**Figura 16** – Conseqüência da segregação da alimentação.

Fonte: Modificado de Van Der Meer e Maphosa, 2012

### 2.5.3.4 Sistema Hidráulico de Pressão

O sistema hidráulico de pressão consiste em quatro cilindros hidráulicos: dois do lado direito e dois do lado esquerdo do rolo móvel. Estes cilindros são ligados por um compartimento de óleo a um cilindro acumulador de nitrogênio, como mostra a Figura 17.

A compressão do nitrogênio no acumulador atua como uma mola do sistema. A pressão de nitrogênio pode ser ajustada a uma operação mais rígida ou mais flexível do rolo móvel.



**Figura 17** – Modelo simplificado do sistema hidráulico.

Fonte: Cortesia KHD-WEIR.

A princípio, o sistema tende rapidamente ao equilíbrio, e as pressões de óleo e nitrogênio serão idênticas, já que se trata de um sistema conectado. Porém, o nitrogênio permite expansões e compressões rápidas, mudando rapidamente de temperatura, e atuando, literalmente, como uma mola, enquanto o óleo não permite variações rápidas. Assim, quanto maior o volume de nitrogênio em relação ao volume de óleo, mais flexível será a mola, para uma mesma pressão inicial.

A fração relativa de volume de nitrogênio é uma função da pressão inicial de nitrogênio e da pressão inicial do sistema hidráulico. Assim, se a pressão inicial requerida for 4 MPa, e a pressão inicial de nitrogênio for ajustada para 4 MPa, não haverá óleo no sistema, e a mola será a mais flexível possível, com um tempo de reação longo. Se a pressão inicial de nitrogênio for ajustada para 2 MPa e, a partir deste valor, ajustar-se à pressão do sistema para 4 MPa, com óleo do sistema hidráulico, ter-se-á uma mola bastante rígida, mas ainda com alguma

flexibilidade. No outro extremo, a pressão inicial de moagem seria ajustada para 4 Mpa somente com óleo do hidráulico, tornando a mola o mais rígida o possível. Esta configuração provavelmente danificaria o sistema rapidamente durante a operação.

Sob operação estável, a pressão nos cilindros será constante e proporcional à pressão inicial mais a resultante do recuo causado pelo deslocamento do rolo móvel para acomodar o leito de material. Esta pressão total resulta na força de moagem.

Como o material nunca é absolutamente homogêneo, a distância entre rolos varia continuamente, com a pressão do sistema variando em torno de um valor médio.

A presença do nitrogênio é que permite variações e em geral a pressão inicial de nitrogênio deve ser ajustada para um valor entre 50 e 75% da pressão inicial de operação. A pressão inicial é então atingida pela adição de óleo ao sistema hidráulico.

O sistema hidráulico necessariamente entra em equilíbrio, e a pressão hidráulica (do óleo) será igual à do nitrogênio e igual à pressão do sistema.

Um batente colocado entre os blocos previne que um rolo encoste ou toque no outro durante a operação, determinando a distância inicial entre rolos.

A distância inicial entre rolos é uma variável controlável do processo e pode ser utilizada para alterar as condições do processo, especialmente no que diz respeito ao ângulo crítico de fricção e à quebra inicial das partículas maiores, perto do tamanho máximo de alimentação.

A distância inicial entre rolos define o ponto de partida em que o sistema hidráulico de pressão começa a atuar.

### 3. High Pressure Grinding Rolls – 3PR7

A Unidade de Tubarão da Vale em Vitória, ES, possui atualmente oito usinas de Pelotização. A HPGR, com identificação ou *tag* 3PR7 estudada nessa dissertação, está instalada na usina de Pelotização 3, Itabrasco.

#### 3.1 Histórico das HPGR na Vale

Em 1989 os primeiros testes com HPGR foram realizados na Vale dentro dos projetos de aumento das capacidades das moagens nas usinas de pelotização existentes na Unidade de Tubarão em Vitória, ES. Os primeiros testes já mostraram o grande potencial das HPGR para aumentar a superfície específica dos finos de minério de ferro para a pelotização, gerando um aumento significativo da produção nas instalações das moagens existentes, compostas de moinhos de bolas.

Em 1994 a Vale iniciou a operação com HPGR em duas de suas usinas de pelotização em Tubarão. Uma unidade alimentando as usinas 1 e 2, posicionada antes dos moinhos de bolas como estágio de “moagem preliminar”, enquanto a outra unidade foi instalada na usina 4, após os moinhos de bolas/estágio de filtragem.

Após os bons resultados obtidos, a HPGR foi instalada nas demais usinas, incluindo a HPGR 3PR7 estudada nessa dissertação, no ano de 2008.

A HPGR 3PR7 é apresentada na Figura 18, sendo facilmente identificado o par de rolos que giram em sentido contrário e os seus cilindros hidráulicos.



**Figura 18** – HPGR 3PR7 pertencente a Vale em Vitória, ES.

Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.2 Dados Nominais e Características

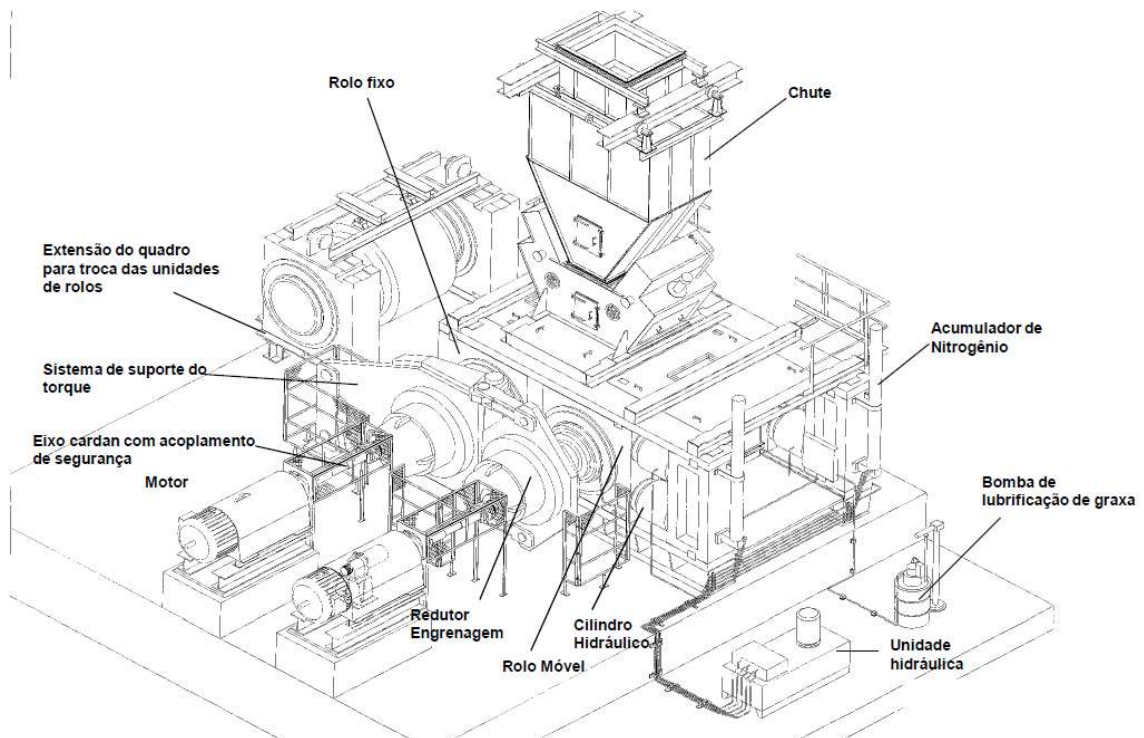
Os principais dados nominais da HPGR são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** - Dados Nominais da HPGR.

| Dados Gerais HPGR           | Motor: 2 Unidades          | Inversor Freqüencia                       |
|-----------------------------|----------------------------|---|
| Fabricante: Polysius        | Fabricante: WEG            | Fabricante: ABB                           |
| Capacidade: 1.200 t/h       | Tipo: CA/3F Assíncrono     | Tipo: ACS 1.000 12 pulsos                 |
| Diametro Rolos: 2.250 mm    | Isolação: F                | Transformador: 2,50 MVA - 13,80/2x2,30 kV |
| Comprimento Rolos: 1.550 mm | Tensão Nominal: 4.00 kV    | Entrada: 2x2,30 kV - 555 A                |
| Pressão Máxima: 180 bar     | Corrente Nominal: 304,40 A | Saída: 0 - 4,16 kV - 615 A                |
| Ano de Fabricação: 2001     | Potência Nominal: 1.800 kW | Potência Nominal: 3.356 kW                |
| Ano de Operação: 2008       | Rotação: 1.192 rpm         | Refrigeração: Água Deionizada             |

Fonte: Produção do próprio autor.

Os principais componentes da HPGR 3PR7 são mostrados na Figura 19.



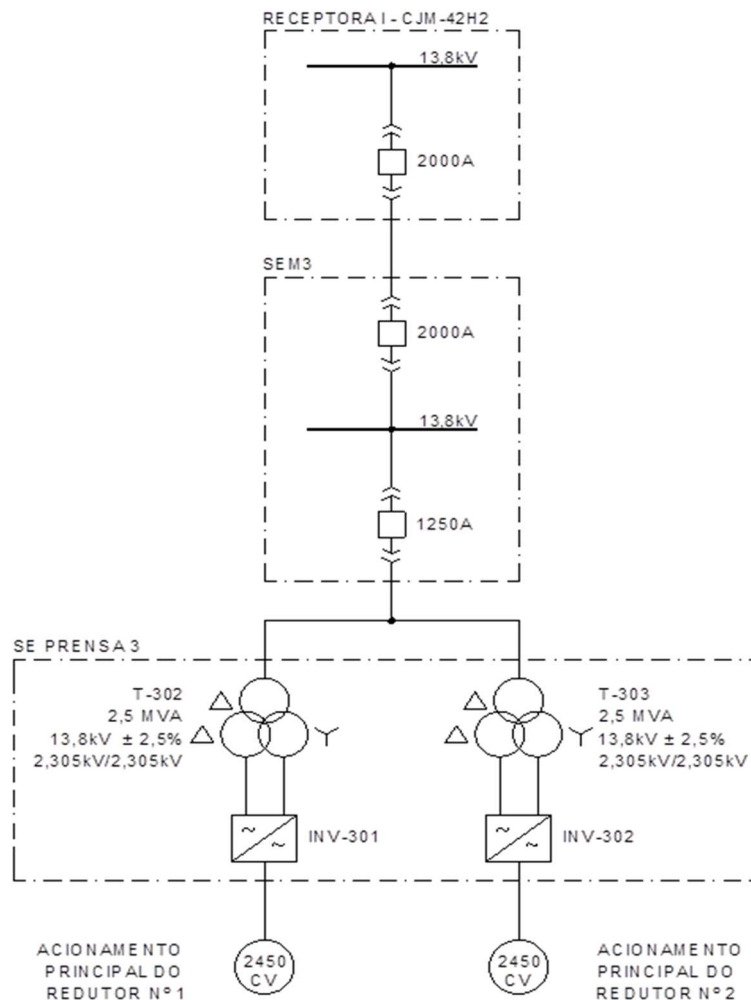
**Figura 19** – Principais Componentes da HPGR 3PR7.

Fonte: Polysius - Manual de Operação e Manutenção 3PR7



A HPGR é alimentada com minério de ferro, e conforme descrito anteriormente, a unidade hidráulica aplica pressão ao leito de minério pelos cilindros hidráulicos sobre o par de rolos que giram em sentido contrário, montados em um quadro rígido, a uma pressão de até 180 bar.

A HPGR 3PR7 é alimentada em 13,80 kV através de um disjuntor localizado na Sala Elétrica SEM3, conforme a Figura 20. Os transformadores defasadores T302 e T303, duplo secundário, alimentam os inversores de frequência INV-301 e INV-302 respectivamente, de fabricação ABB, modelo ACS1000, 12 pulsos, tensão imposta, controle vetorial, alimentados em 2,30 kV, configuração mestre escravo e *sensorless*, ou seja, não necessitam de sensores para realimentação do sinal de velocidade. Esses controlam e protegem os dois motores de 1.800 kW cada, de tensão nominal 4.000 V que acionam os redutores dos rolos fixos e móveis da HPGR, mostrados na Figura 21.



**Figura 20** – Diagrama Unifilar Simplificado da HPGR 3PR7.

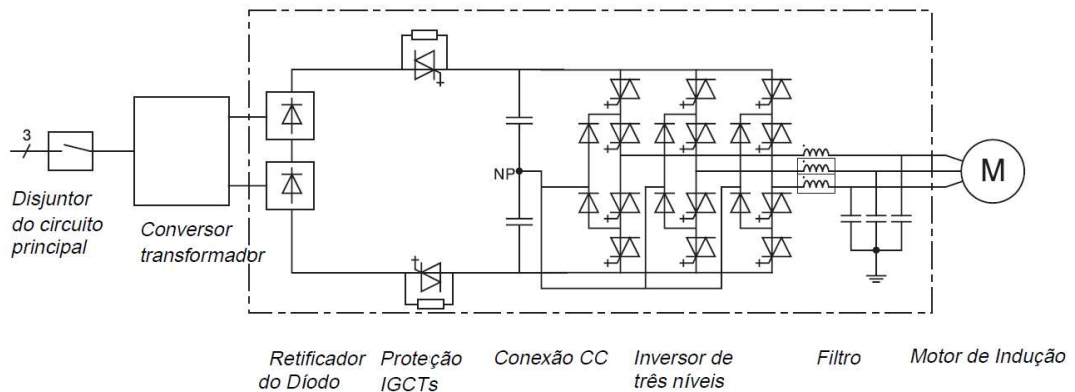
Fonte: Vale Diagrama Elétrico.



**Figura 21** – Motores de Acionamento da HPGR 3PR7.

Fonte: Produção do próprio autor.

Os inversores ACS1000 possuem circuito de entrada equipado com uma ponte retificadora de diodos de 12 pulsos conforme Figura 22 que é adequada à maioria das redes de alimentação e aos requerimentos harmônicos, conforme exigido pelos padrões da IEEE 519.



**Figura 22** – Diagrama do Inversor de Frequência.

Fonte: ABB, *Medium Voltage AC Drive Manual. Model 301/302 ACS1000, 12 pulses*, 2005

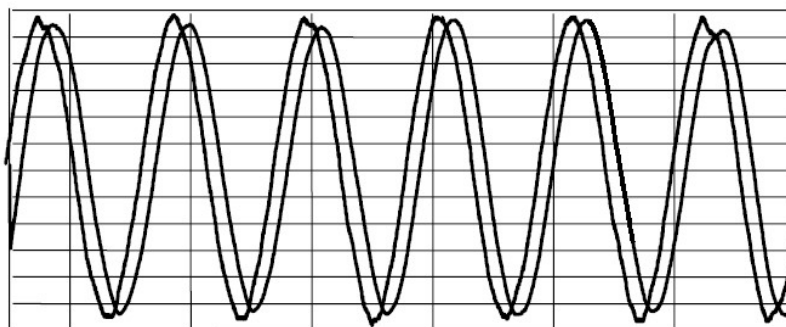
A tensão do circuito alimentador, CA trifásico, é fornecido às pontes retificadoras através do transformador defasador para obter uma retificação de 12 pulsos, sendo necessária um deslocamento de fase de  $30^\circ$  entre os dois enrolamentos secundários do transformador. Portanto, um secundário é conectado em ligação estrela ou Y e o outro a uma conexão delta ou triângulo. As duas pontes retificadoras são conectadas em série, de modo que as tensões CC

são somadas. Portanto, a corrente total do barramento de corrente contínua (CC) passa entre as duas pontes.

O ACS 1000 apresenta um conceito patenteado que usa um semicondutor IGCT para a proteção do circuito ao invés dos fusíveis convencionais. O IGCT, que é colocado entre a conexão CC e o retificador, pode isolar diretamente o inversor do lado da força de alimentação dentro de 25  $\mu$ s, o que o faz 1000 vezes mais rápido do que o desempenho operacional dos fusíveis. As resistências de pré-carga limitam a corrente na conexão CC, quando o inversor é energizado. A principal função desses IGCTs de proteção é abrir no caso de um defeito, para evitar que o retificador alimente o defeito.

Cada segmento da ponte trifásica da unidade inversora consiste numa combinação de 2 IGCTs para a operação de ligação de 3 níveis: a saída é ligada entre a tensão CC positiva, ponto neutro (*neutro point* NP) e a tensão CC negativa. Portanto, ambas a frequência e a tensão de saída podem ser controladas continuamente de zero até o máximo, usando o controle de torque direto.

O circuito de saída apresenta um filtro com característica de passa baixa usado para reduzir o conteúdo harmônico da tensão de saída. Com esse filtro, a forma de onda de tensão aplicada ao motor é quase senoidal, conforme a Figura 23.

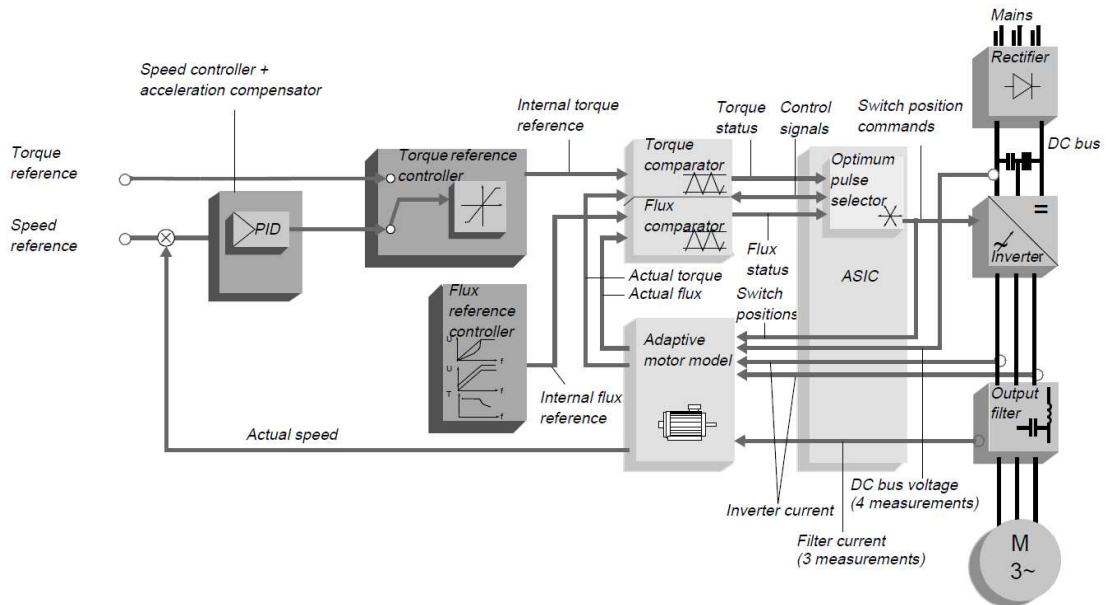


**Figura 23** – Forma de Onda para Corrente e Tensão na Saída do Inversor.

Fonte: ABB, *Medium Voltage AC Drive Manual. Model 301/302 ACS1000, 12 pulses*, 2005

Por isso, não há necessidade de utilizar motores com isolamento especial para utilização com inversores de frequência, pois o filtro também elimina todos os problemas por  $dv/dt$  e, com isso, as reflexões de tensão no motor e as sobrecargas no isolamento do motor são totalmente eliminadas.

O inversor ACS1000 possui o método de controle de motor CA chamado de Controle de Torque Direto – *Direct Torque Control*, DTC. O chaveamento do inversor é controlado diretamente de acordo com fluxo do motor e o torque. O diagrama de blocos do DTC é visualizado na Figura 24.



**Figura 24** – Diagrama de Bloco para Controle de Torque Direto – Direct Torque Control, DTC.

Fonte: ABB, *Medium Voltage AC Drive Manual. Model 301/302 ACS1000, 12 pulses, 2005*

A corrente medida do motor e a tensão do barramento CC são entradas para um modelo adaptável de motor, que produz na saída valores reais e exatos de torque e fluxo a cada 25  $\mu$ s. Esse modelo do motor é composto de todo o circuito equivalente do motor, fornecido pelo fabricante, e demais variáveis calculadas através de software do próprio inversor. Comparadores de torque e fluxo do motor comparam esses valores com os valores de referência produzidos pelos blocos de referência de torque e fluxo. Dependendo das saídas dos controladores de histerese, a seleção dos pulsos determina diretamente as posições ideais da ligação da unidade inversora, ou seja, o chaveamento da unidade inversora é diretamente controlado pelas variáveis fluxo do núcleo e torque do motor.

## 4. Limitações Operacionais e Diagnóstico da Causa

Ganho de superfície específica, eficiência energética, custo específico de prensagem são monitorados como indicadores de desempenho e processo da HPGR.

As variáveis de controle: pressão específica aplicada, torque, corrente dos motores, velocidade periférica, pressão aplicada, taxa de alimentação, nível de coluna, desalinhamento e outras, definem o desempenho satisfatório da HPGR.

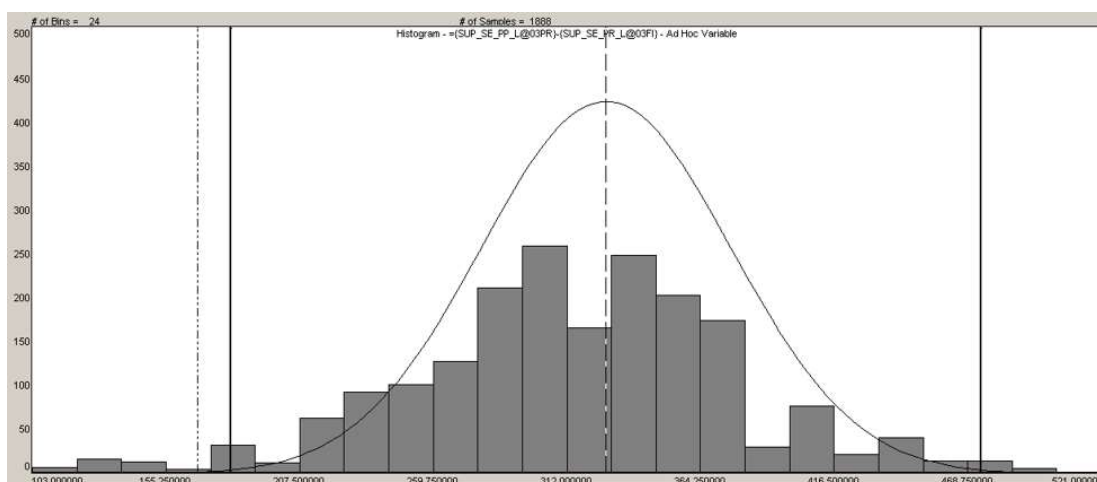
### 4.1 Limitações Operacionais da HPGR 3PR7

A HPGR estudada nessa dissertação, desde a sua implantação em 2008, apresentava limitações operacionais a saber: não formação de coluna sobre os rolos.

A formação de coluna de minério sobre os rolos favorece a distribuição uniforme do material sobre os rolos, realizando a quebra das partículas de uma forma predominantemente autógena, importante para a qualidade do produto cominuído.

A não formação de coluna contribui para a variabilidade do ganho da HPGR, exemplificada na Figura 25, variabilidade no pelotamento e perda de produtividade da moagem. Também contribui para a não distribuição uniforme do material sobre os rolos, causando desgastes desiguais nas superfícies dos rolos.

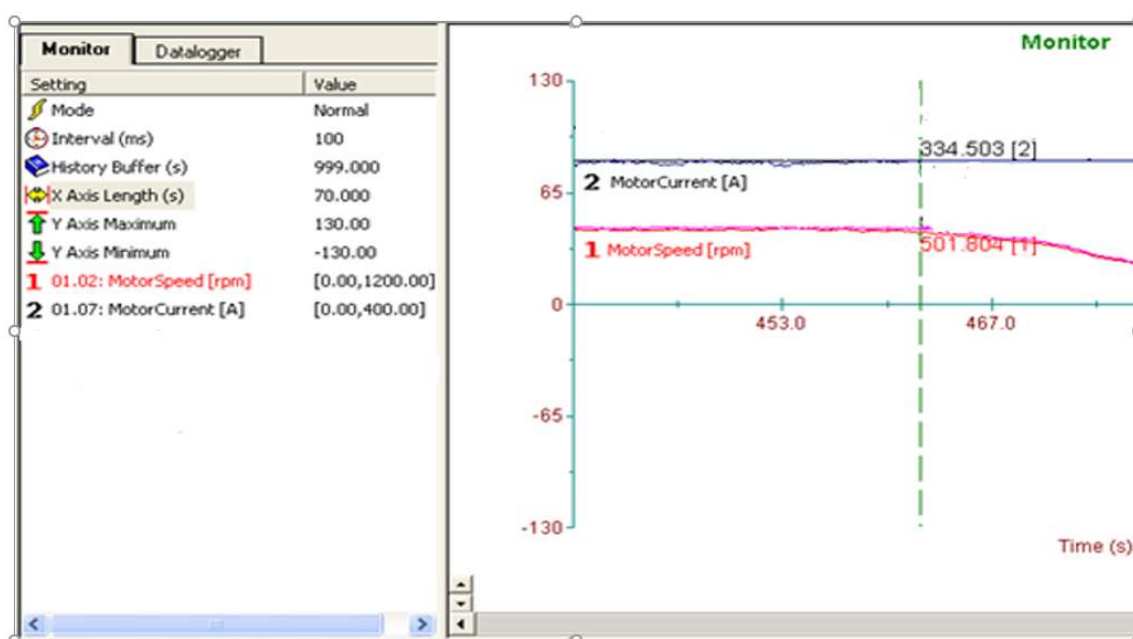
A não formação de coluna é causada pela elevada rotação dos rolos. A rotação nominal dos motores de 1.192 rpm é muito superior ao necessário para esse processo.



**Figura 25** – Variabilidade do ganho da HPGR 3PR7 variando de 103 a 521 cm<sup>2</sup>/g.

Fonte: Produção do próprio autor.

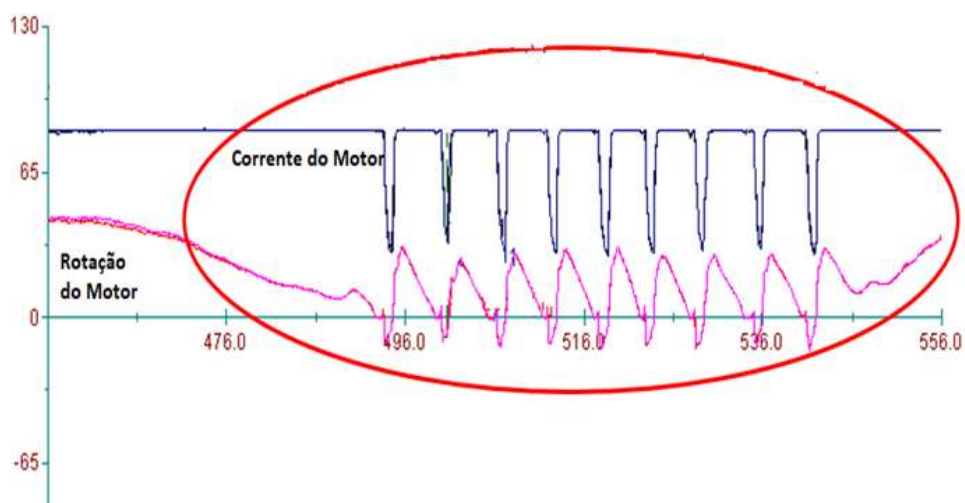
A HPGR é caracterizada como uma carga de conjugado constante durante a variação de velocidade. Para baixas rotações, os inversores de frequência de tensão imposta, fornecem uma tensão reduzida para os motores elétricos. Para atenderem a demanda da carga, a saber o material a ser cominuído nos rolos da HPGR, é requerida uma elevada corrente nos motores elétricos para compensar a tensão reduzida em seus terminais. Essa corrente solicitada é superior à corrente nominal do motor. Exemplificando, é apresentado na Figura 26 o registro das variáveis rotação e corrente do motor mestre conforme curvas 1 e 2 respectivamente, mostrando a HPGR 3PR7 operando com 42% da rotação nominal, mas já com 110% da corrente nominal dos motores elétricos.



**Figura 26** – Exemplo de limitação operacional da HPGR 3PR7.

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 27 é apresentado um cenário real que o inversor realiza a proteção do motor, limitando a corrente, gráfico azul, dentro de seu valor nominal. Ao receber um pequeno degrau de torque causado por variação da carga, o motor não consegue atender a esse degrau, pois já está em sua máxima corrente. A consequência é a redução da rotação até a parada da HPGR.



**Figura 27** – A limitação da corrente do motor gerando parada da HPGR 3PR7.

Fonte: Produção do próprio autor.

Essa parada do equipamento provoca um efeito cascata, pois eleva o nível da coluna de minério na entrada da HPGR, necessitando a imediata elevação da rotação do motor para que não ocorra transbordo de minério pelo silo alimentador. O inversor envia o comando para acelerar o motor, mas novamente é limitado pela proteção do inversor que limita a corrente do motor em seu valor nominal. Essa limitação é apresentada na Figura 27 nas curvas rotação e corrente do motor, com as várias tentativas de elevação da rotação e sucessivas paradas da HPGR.

Para permitir a operação da HPGR e não gerar desarmes pela proteção do inversor, foi limitada a sua rotação mínima em 596 rpm (50% da nominal) após a fase de comissionamento do equipamento, permanecendo até os dias atuais. Nessa rotação mínima não há formação de coluna de minério na entrada da HPGR, resultando em alta variabilidade de ganho apresentada anteriormente na Figura 25 e menor ganho de superfície.

## 4.2 Metodologia de Testes das Limitações Operacionais da HPGR

Para melhor conhecer as limitações da HPGR e quantificar as influências das variáveis de processo e operacionais nessas limitações, foram realizados testes controlados no próprio equipamento por equipe multidisciplinar.

Foram montados 13 cenários operacionais, alterando os *setpoints* da taxa de alimentação, pressão aplicada nos rolos e também a rotação dos rolos.

Para cada cenário foram registrados:

- Torque da carga.
- Rotação e corrente para os 2 motores da HPGR.
- Pressão hidráulica do rolo móvel.
- *Gaps* dos lados direito e esquerdo;
- Medição do nível da coluna.
- Taxa de alimentação fornecida a HPGR.

Também foram coletadas amostras dos materiais antes e após a prensagem para cada cenário, definindo em testes de laboratório a umidade e superfície específica.

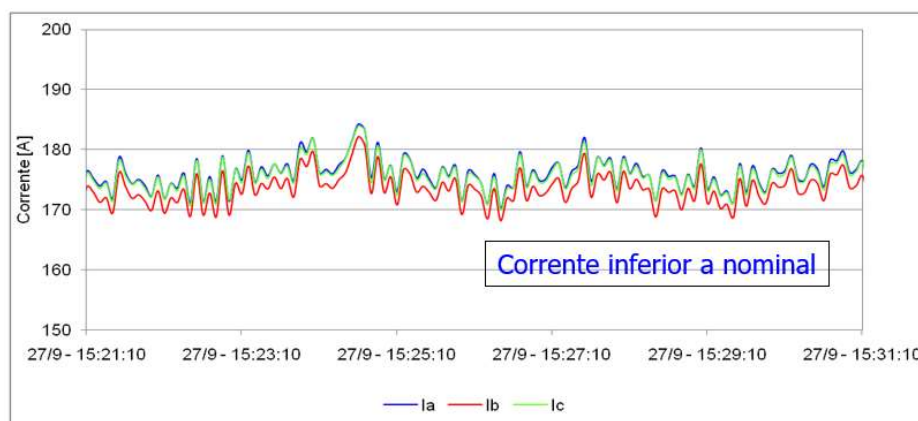
Durante os testes foram medidas as variáveis elétricas através de registrador de grandezas em tempo real para sistemas elétricos trifásicos, fabricante RMS, tipo MARH-21 e modelo 993.

Também foram registradas as grandezas informadas pelo inversor de frequência. Os valores informados por essas duas últimas foram compatíveis.

Seguem os resultados dos testes para esses 13 cenários:

**Cenário 1: Pressão: 40 bar; Taxa de alimentação: 500 t/h;  
Rotação mínima limitada a 35% da nominal.**

A corrente do motor se manteve em 54% da nominal de 304,4 A, não oferecendo risco ao equipamento conforme Figura 28. Entretanto, com uma taxa de alimentação de 500 t/h e a rotação mínima limitada a 35% da nominal, não houve formação de coluna na alimentação da HPGR.



**Figura 28** – Correntes eficazes medidas no intervalo do cenário 1.

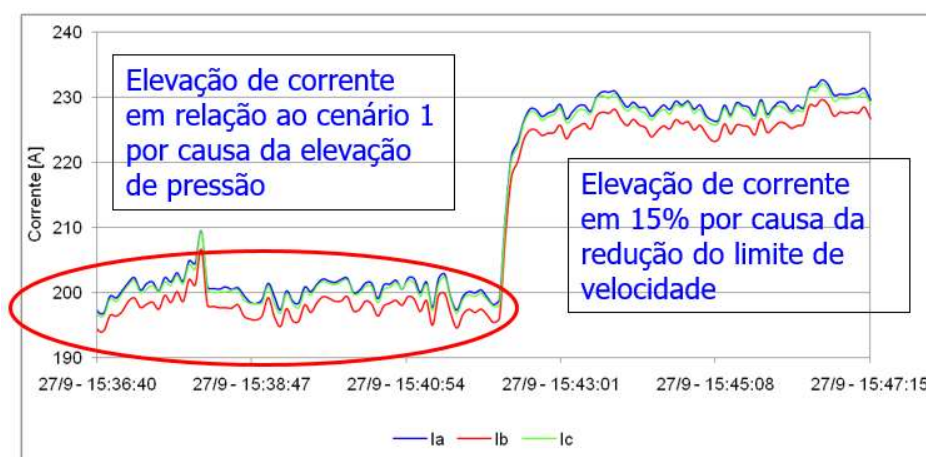
Fonte: Produção do próprio autor.



**Cenário 2: Pressão: 50 bar; Taxa de alimentação: 500 t/h;  
Rotação mínima limitada a 35% da nominal e após reduzida para 30% da nominal.**

Foi elevada a pressão dos rolos em 10 bar em relação ao cenário 1, ocasionando o aumento da corrente do motor, mas ainda se mantendo abaixo da nominal. Nessa configuração, conforme esperado, não houve formação de coluna na alimentação da HPGR.

Durante o teste foi reduzido o limite da rotação para 30% da nominal, sendo registrado o aumento da corrente do motor, Figura 29 a seguir, mas ainda se mantendo abaixo da nominal de 304,4 A. Mesmo com essa redução da rotação, com uma taxa de alimentação de 500 t/h não houve formação de coluna na alimentação da HPGR.

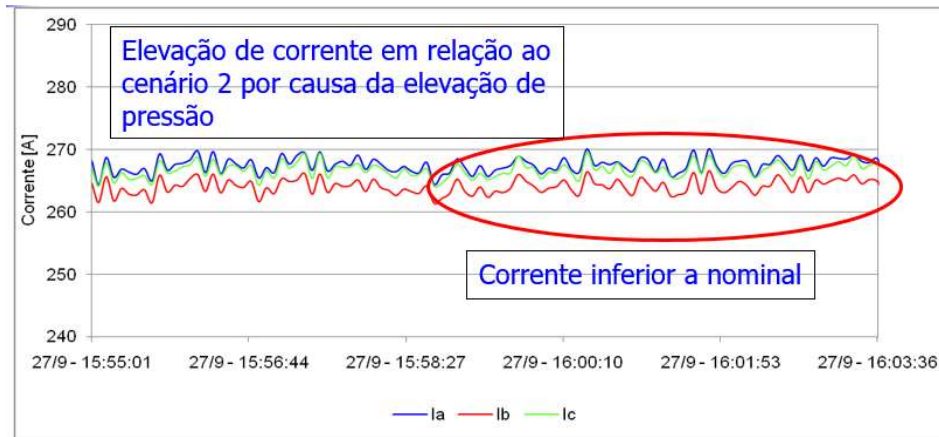


**Figura 29** – Correntes eficazes medidas no intervalo do cenário 2.

Fonte: Produção do próprio autor.

**Cenário 3: Pressão: 58 bar; Taxa de alimentação: 500 t/h;  
Rotação limitada a 30% da nominal**

Foi elevada a pressão dos rolos para 58 bar, resultando no aumento da corrente do motor, mas se mantendo abaixo da nominal, conforme Figura 30. Também não foi registrada a formação de coluna na alimentação da HPGR com essa taxa de alimentação e rotação mínima.

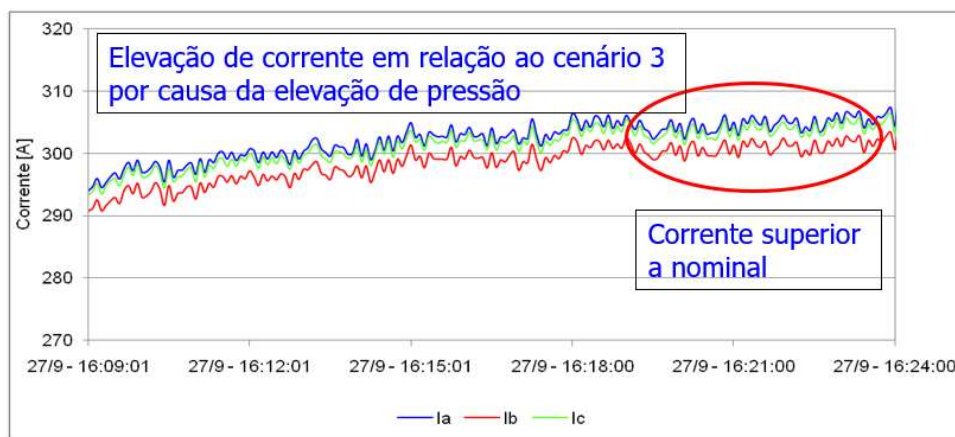


**Figura 30** – Correntes eficazes medidas no intervalo do cenário 3.

Fonte: Produção do próprio autor.

**Cenário 4: Pressão: 63 bar; Taxa de alimentação: 500 t/h;  
Rotação limitada a 30% da nominal**

Foi elevada a pressão dos rolos em 23 bar acima da medida no cenário 1, resultando no aumento da corrente do motor acima da nominal de 304,4 A conforme Figura 31. Não foram alteradas as taxas de alimentação e rotação mínima do cenário anterior, portanto não foi registrado formação de coluna na alimentação da HPGR.



**Figura 31** – Correntes eficazes medidas no intervalo do cenário 4.

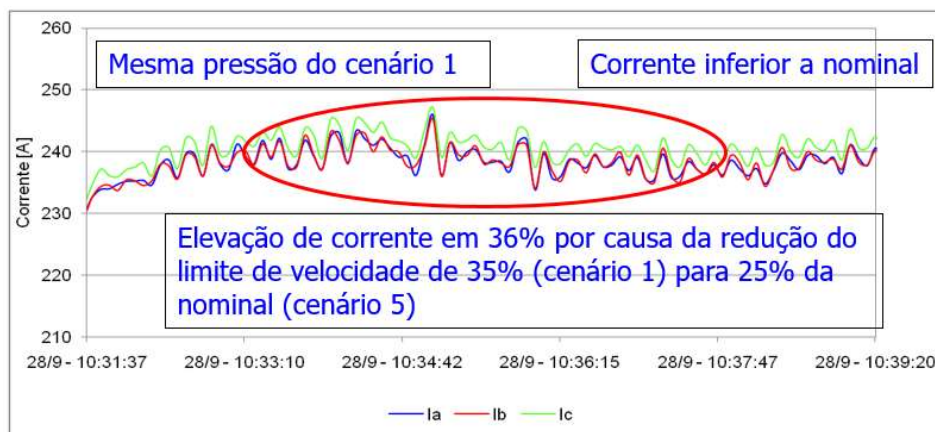
Fonte: Produção do próprio autor.

**Cenário 5: Pressão: 40 bar; Taxa de alimentação: 550 t/h;  
Rotação limitada a 25% da nominal**

Para os cenários de 5 a 8, foi elevada para 550 t/h a taxa de alimentação.

Para o cenário 5, elevando a taxa de alimentação em 50 t/h em relação aos cenários anteriores e rotação mínima em 25% da nominal, isto é, 298 rpm, foi registrada pela primeira vez a formação de coluna na alimentação da HPGR.

A corrente do motor teve um acréscimo de 36% quando comparada ao cenário 1 (mesma pressão dos rolos) por causa da redução da rotação mínima para 25% da nominal, mas inferior a nominal de 304,4 A – Figura 32.

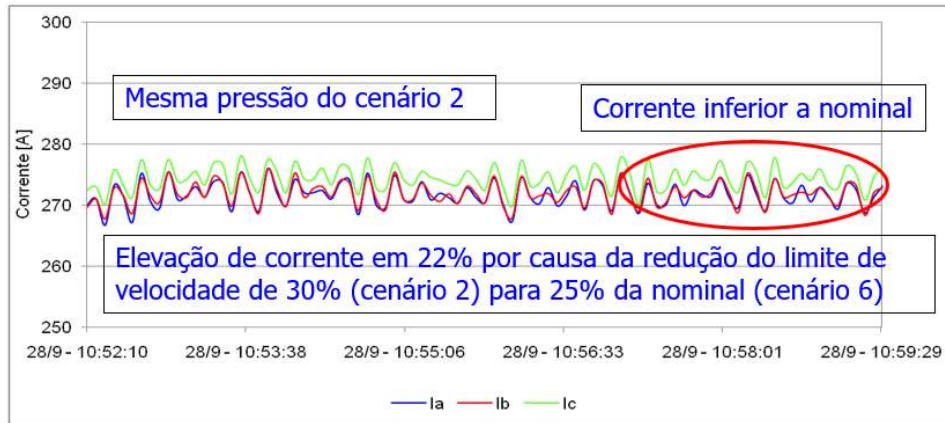


**Figura 32** – Correntes eficazes medidas no intervalo do cenário 5.

Fonte: Produção do próprio autor.

**Cenário 6: Pressão: 48 bar; Taxa de alimentação: 550 t/h;  
Rotação limitada a 25% da nominal**

Foi elevada a pressão dos rolos em 8 bar em relação ao cenário 5, ocasionando o aumento da corrente do motor, mas abaixo da nominal. Também comparada ao cenário 2 (mesma pressão), a corrente teve um acréscimo por causa da redução da rotação mínima de 30% para 25% da nominal conforme Figura 33.



**Figura 33** – Correntes eficazes medidas no intervalo do cenário 6.

Fonte: Produção do próprio autor.

Nesse cenário 6, conforme apresentado no cenário 5, também houve formação de coluna na alimentação da HPGR.

**Cenário 7: Pressão: 57 bar; Taxa de alimentação: 550 t/h;  
Rotação limitada a 25% da nominal**

Foi elevada a pressão dos rolos para 57 bar, próxima da pressão do cenário 3, mas com o registro da corrente do motor superior a nominal de 304,4 A, vide Figura 34, consequência da redução do limite de rotação entre esses cenários.



**Figura 34** – Correntes eficazes medidas no intervalo do cenário 7.

Fonte: Produção do próprio autor.

Foi registrado formação de coluna na alimentação da HPGR com essa taxa de alimentação e rotação mínima.

Para o Cenário 8, a pressão máxima registrada foi 61 bar e a corrente atingiu o limite máximo imposto pelo inversor de 330 A, isto é, 110% da nominal do motor. Essas características já foram tratadas no cenário anterior e não foi apresentado graficamente nessa seção.

Foi registrado formação de coluna com essa taxa de alimentação e rotação mínima.

**Cenário 9: Pressão: 40 bar; Taxa de alimentação: 600 t/h;  
Rotação limitada a 25% da nominal:**

Para os cenários de 9 a 12, foi elevada para 600 t/h a taxa de alimentação, que irá contribuir para a formação de coluna na alimentação da HPGR.

Para o cenário 9, vide Figura 35, elevando a taxa de alimentação em 50 t/h em relação aos cenários anteriores e mantendo a rotação mínima em 25% da nominal, foi registrada formação de coluna de minério com a corrente do motor abaixo da nominal. Comparando os cenários 9 e 5 (mesma pressão e rotação), a variação da taxa de alimentação não possui relevância na variação da corrente do motor.

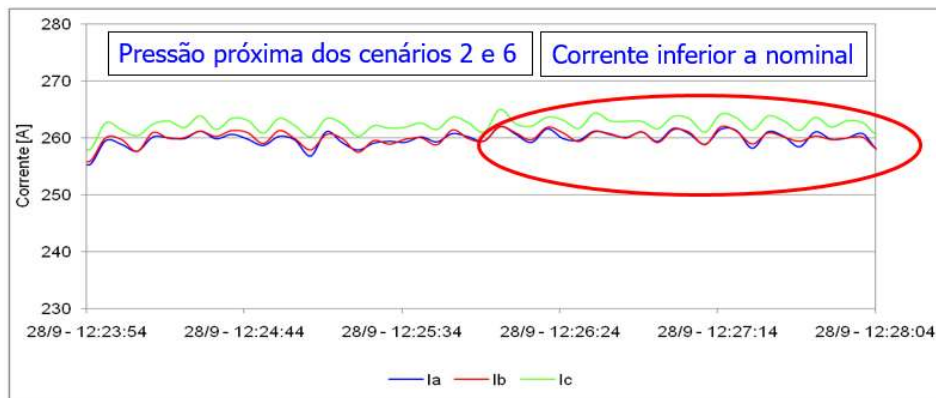


**Figura 35** – Correntes eficazes medidas no intervalo do cenário 9.

Fonte: Produção do próprio autor.

**Cenário 10: Pressão: 46 bar; Taxa de alimentação: 600 t/h;  
Rotação limitada a 25% da nominal**

Para o cenário 10, elevando em 6 bar a pressão nos rolos comparado ao cenário 9, resultou no aumento da corrente, mas ainda dentro dos limites nominais conforme Figura 36. Foi registrada formação de coluna de minério na entrada da HPGR.



**Figura 36** – Correntes eficazes medidas no intervalo do cenário 10.

Fonte: Produção do próprio autor.

Para os cenários 11 e 12, para pressões acima de 57 bar, as correntes registradas foram superiores a nominal do motor. Essas características já foram tratadas em cenários anteriores e não foram apresentadas graficamente nessa seção. Foi registrado formação de coluna em ambos os cenários com essa taxa de alimentação e rotação mínima.

Para o cenário 13 foi elevada para 650 t/h a taxa de alimentação e o resultado é compatível com outros cenários anteriores e não foi apresentado graficamente nessa seção. Houve formação de coluna de minério na entrada da HPGR para esse cenário.

Os resultados dos testes dos 13 cenários operacionais são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 - Resultados dos testes operacionais na HPGR.

| Testes na HPGR |                    |                 |             |                        |                |                     |                                |                                |            |
|----------------|--------------------|-----------------|-------------|------------------------|----------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|
| Cenário        | Variáveis do Teste |                 |             | Resultado do Teste     |                | Materiais Coletados |                                |                                |            |
|                | Pressão (bar)      | Taxa Alim (t/h) | Rot (% nom) | Corrente Motor (% nom) | Formou coluna? | Antes da Prensagem  |                                | Pós-Prensagem                  | Resultados |
|                |                    |                 |             |                        |                | Umid (%)            | Sup Espec (cm <sup>2</sup> /g) | Sup Espec (cm <sup>2</sup> /g) |            |
| 1              | 40                 | 500             | 35          | 54                     | Não            | 8,2                 | 1570                           | 1750                           | 180,0      |
| 2              | 50                 | 500             | 30          | 76                     | Não            | 8,2                 | 1570                           | 1770                           | 200,0      |
| 3              | 58                 | 500             | 30          | 87                     | Não            | 8,2                 | 1580                           | 1800                           | 220,0      |
| 4              | 63                 | 500             | 30          | 101                    | Não            | 8,2                 | 1580                           | 1820                           | 240,0      |
| 5              | 40                 | 550             | 25          | 80                     | Sim            | 8,5                 | 1570                           | 1820                           | 250,0      |
| 6              | 48                 | 550             | 25          | 90                     | Sim            | 8,5                 | 1570                           | 1830                           | 260,0      |
| 7              | 57                 | 550             | 25          | 102                    | Sim            | 8,5                 | 1570                           | 1850                           | 280,0      |
| 8              | 61                 | 550             | 25          | >110                   | Sim            | 8,5                 | 1570                           | 1860                           | 290,0      |
| 9              | 40                 | 600             | 25          | 80                     | Sim            | 8,5                 | 1570                           | 1820                           | 250,0      |
| 10             | 46                 | 600             | 25          | 86                     | Sim            | 8,5                 | 1570                           | 1830                           | 260,0      |
| 11             | 60                 | 600             | 25          | 104                    | Sim            | 8,6                 | 1610                           | 1880                           | 270,0      |
| 12             | 58                 | 600             | 25          | >110                   | Sim            | 8,6                 | 1610                           | 1860                           | 250,0      |
| 13             | 57                 | 650             | 25          | 108                    | Sim            | 8,6                 | 1610                           | 1850                           | 240,0      |

Fonte: Produção do próprio autor.

O ganho de superfície é definido como a diferença entre a superfície específica do material antes e após a prensagem, medido em cm<sup>2</sup>/g.

Os resultados dos testes mostraram que para os cenários 5, 6, 9 e 10, dependendo da taxa de alimentação, pressão e rotação dos rolos, é possível formação de coluna com correntes dos motores dentro dos valores nominais, apresentando melhores ganhos para a HPGR.

Também foram registrados formação de coluna nos cenários 7, 8, 11, 12 e 13, mas operando com correntes superiores à nominal do motor.

## 5. Modelagem por Regressão Linear como Solução para Limitações Operacionais

### 5.1 Modelagem por Regressão Linear

A Regressão Linear é uma das ferramentas estatísticas mais utilizadas na modelagem de dados e consiste, em sua essência, na determinação de uma equação ou modelo que descreva de maneira eficiente o efeito de um grupo de variáveis independentes sobre uma ou mais variáveis dependentes.

A análise de regressão é uma das ferramentas mais utilizadas para a análise de dados, sendo aplicada em quase todas as áreas de conhecimento, incluindo: engenharia, física, química, administração, ciências biológicas e agronomia. A simplicidade e utilidade dessa técnica são resultantes do conceito lógico de utilizar uma equação matemática para expressar a relação entre variáveis, sendo interessante devido à base matemática e bem desenvolvida teoria estatística (MONTGOMERY et al., 2001).

#### 5.1.1 Modelo de Regressão Linear Simples

O modelo de regressão linear simples é representado pela seguinte Equação (MONTGOMERY et al., 2001).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

Equação 7

Segundo Neter et al. a Equação 7 é dita simples, pois representa a relação entre uma característica de interesse  $Y$  e uma variável de controle, sendo linear nos parâmetros, pois nenhum dos parâmetros aparece como expoente ou está sendo multiplicado ou dividido por outros parâmetros.

Montgomery et al. (2001) afirmam que a variável  $X$  deve ser vista como sendo uma variável de controle e medida com erro desprezível, enquanto a variável  $Y$  é vista como uma variável aleatória. Dessa forma, existe uma distribuição de probabilidade para cada  $Y$ . O termo  $\varepsilon$  é chamado de erro aleatório.

Para o uso de um modelo de regressão linear simples, é necessário utilizar um gráfico de dispersão, que, de acordo com Montgomery e Runger (2003) é uma ferramenta de cada par



$(X_i, Y_i)$ , em um ponto plotado em um sistema bidimensional, a qual indica se os pontos estão aleatoriamente dispersos em torno de uma linha reta.

### 5.1.2 Modelo de Regressão Linear Múltipla

De acordo com Montgomery et al. (2001), o modelo de regressão linear múltipla com  $k$  variáveis de controle é representado pela Equação 8 a seguir:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i$$

Equação 8

Os coeficientes de regressão  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$  são descritos por Montgomery et al. (2001) como:

- a) O coeficiente  $\beta_0$  é chamado de coeficiente de intercepto, o qual corresponde à média de  $Y_i$  quando todas as variáveis de controle são iguais a zero;
- b) Os coeficientes  $\beta_1, \dots, \beta_k$  são chamados de coeficientes de regressão parciais. O coeficiente  $\beta_k$  pode ser interpretado como a derivada parcial de  $Y_i$  em relação a  $X_{ki}$ , ou seja, é variação de  $Y$  causada por uma variação unitária em  $x_k$  dado que as outras variáveis de controle sejam mantidas constantes.

Para modelos de regressão linear múltipla para  $k$  elevado, é mais prático a Equação 8 expressa em notação matricial, pois permite uma apresentação mais compacta do modelo, dados e resultados para qualquer número de variáveis (MONTGOMERY et al., 2001). Um modelo de regressão linear múltipla pode ser representado pela Equação 9:

$$y = X\beta + \varepsilon$$

Equação 9

Onde:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Dados multivariados ocorrem com frequência em investigações empíricas. Em estudos econômicos, por exemplo, pode-se avaliar o efeito de medidas de ajuste tributário sobre indicadores de desempenho econômico (ADELMAN et al., 1969). Em estudos de Engenharia, pode-se estudar o efeito de diferentes ajustes nos controles de um equipamento sobre as características de unidades por ele produzidas (FOGLIATTO et al., 1998). Em ambos os casos, deseja-se analisar o efeito de um grupo de variáveis independentes (medidas de ajuste tributário, ajustes nos controles de um equipamento) sobre um grupo de variáveis dependentes (indicadores de desempenho econômico, características do produto). Outros exemplos podem ser encontrados em JOHNSON & WICHERN (1992).

Modelos de regressão são, via de regra, utilizados para fins de predição, estimação e controle (MONTGOMERY & PECK, 1992). Em todos os casos, desejam-se modelos que possam ser utilizados como estimadores eficientes das variáveis dependentes modeladas.

Para essa dissertação, a MRL será realizada através do *software* para plataformas de análises preditivas, IBM SPSS Modeler.

O IBM SPSS Modeler é um *software* desenvolvido pela IBM para aplicações de modelagem matemática avançada através de uma interface amigável. É formado pelos blocos de operações estatísticas, seleção, segmentação, agrupamento, pré-tratamento de dados e modelagem. Este *software* viabiliza extrair informações de grandes bancos de dados, fornecendo modelos preditivos de variáveis de interesse do problema analisado, usando variadas metodologias: regressão simples, multivariada, redes neurais, floresta randômica, árvores de decisão, etc.

## 5.2 MRL para Definição da Rotação da HPGR

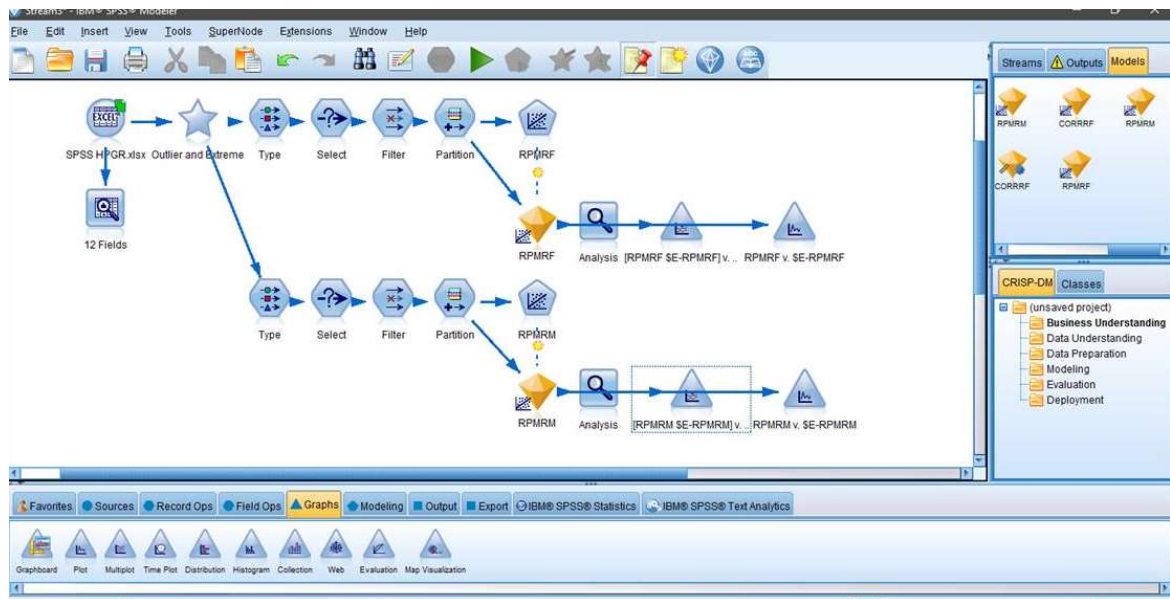
Já foi mencionado que a HPGR 3PR7 opera com a sua rotação mínima limitada em 50% da nominal do motor, isto é, uma rotação fixada pelo sistema de controle em 596 rpm. A operação dessa HPGR com rotações inferiores a esse limite, dependendo das outras variáveis do processo, ocasionavam parada da HPGR.

Os resultados dos testes realizados apresentaram também que, dependendo dos valores da taxa de alimentação, pressão e rotação dos rolos, é possível operar a HPGR 3PR7 sem desarmes e com melhores ganhos.

Para identificar a rotação mínima a ser aplicada para HPGR para que não gerassem ocorrências de desarmes, foi utilizado a Modelagem por Regressão Linear – MRL.

Testes na HPGR alterando as variáveis de processo, e novas modelagens foram refeitas para aprimoramento do modelo definido pela MRL.

A MRL foi realizada através do *software* para plataformas de análises preditivas, IBM SPSS Modeler. A Figura 37 mostra a modelagem obtida para a rotação dos rolos fixo e móvel da HPGR 3PR7:



**Figura 37** – Blocos utilizados pelo *software* SPSS para MRL da HPGR 3PR7.

Fonte: Produção do próprio autor.

O primeiro bloco mostrado na Figura 37, é o banco de dados (BD) carregado pelo *software Excel*. Para a simulação foram coletados mais de 4.000 pontos para cada uma das variáveis relevantes para otimizar os ganhos da HPGR para definição do modelo.

O bloco abaixo dele, denominado nesse modelo de “12 *Fields*” é uma operação de auditoria dos dados, em que o usuário analisa os dados extremos e *outliers*, isto é, valores aberrantes ou valores atípicos, que apresentam um grande afastamento dos demais da série, definindo ou não pela sua exclusão. Após a definição dos dados, este bloco cria um conjunto de operações sequenciadas para realizar o tratamento definido, e compila todas estas operações em um único símbolo, o bloco identificado como uma estrela, para evitar poluição visual do fluxograma.

Desse último bloco, “estrela”, ramificam dois conjuntos de fluxogramas: os modelos para o rolo fixo (parte superior) e rolo móvel (parte inferior), que serão tratados separadamente pela modelagem.

O bloco “*Type*” é o local que é selecionado a variável alvo (*out*) para os modelos de predição. Nesse modelo, o alvo (*out*) é a variável rotação da HPGR para os rolos fixo e móvel.

No bloco “*Select*” é realizado o filtro por data, *range* de uma determinada variável e quais serão as variáveis de entrada (*in*) dos modelos.

No bloco “*Partition*” é separado a quantidade de dados desejados para treino, teste e validação, geralmente adotado uma razão de 70/20/10.

No bloco identificado com um gráfico de dispersão e uma reta, é o bloco de regressão linear. Nessa simulação, a “RPMRF e RPMRM” (rotação dos rolos fixo e móvel respectivamente) é multivariada. É neste bloco que o *software* irá gerar a equação que melhor prediz a variável resposta com o menor erro possível.

No bloco representado por um diamante amarelo é apresentado o produto gerado da modelagem. Nele é possível visualizar as informações do modelo, como qual é a equação e o grau de influência das variáveis de entrada no modelo.

A lupa, denominada “*Analysis*”, é um operador de análise do modelo. Nele é visualizado o erro médio, desvio padrão, maior/menor erro e outros.

O último bloco é um operador de gráfico que gera os gráficos desse modelo, incluindo os dados da variável de interesse real x validação, real x treino e real x teste.

Conforme apresentado anteriormente, a aplicação mais comum da MRL é na estimação da característica de interesse Y para um conjunto de valores das variáveis de controle do modelo. Esta estimativa pode ser utilizada de duas formas: (i) estimação da resposta média e (ii) predição de novas observações. A diferença entre essas duas observações recai no fato de que a estimativa da resposta média é calculada com base em um conjunto de valores das variáveis de controle que foi utilizado para estimar o modelo de regressão, enquanto a previsão de novos valores é estimada através de um conjunto de valores para as variáveis de controle.

Essas duas formas serão utilizadas para definir a solução para a limitação operacional da HPGR:

- a) As características de interesse Y, a saber a rotação do motor do rolo fixo (RMRF) e a rotação do motor do rolo móvel (RMRM), serão definidas através da estimativa da resposta média e calculada com base em um conjunto de valores das variáveis de controle, a saber taxa de alimentação (TA), corrente do motor rolo fixo (CMRF), corrente do motor rolo móvel (CMRM), pressão rolo (PRSSR) e gap dos rolos (GAP), todas conhecidas e utilizadas para estimar o modelo de regressão.

- b) A previsão de novos valores que se deseja são as rotações mínimas dos motores do rolo fixo e rolo móvel,  $RMRF_{min}$  e  $RMRM_{min}$  respectivamente, que operam com correntes dos motores dentro dos valores nominais, portanto sem desarmes da HPGR, e dependendo das demais variáveis, geram formação de coluna na HPGR.

Utilizando o modelo de equação da regressão linear múltipla apresentada anteriormente, Equação 8 e transcrita a seguir, são definidas as equações lineares da rotação do motor do rolo fixo (RMRF) e a rotação do motor do rolo móvel (RMRM), definidas pelo bloco de regressão linear do *software* IBM SPSS Modeler:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i$$

Equação 8

$$\mathbf{RMRF} = 615,7 + 0,8123\mathbf{TA} - 1,537\mathbf{CMRF} + 1,392\mathbf{PRSSR} - 48,92\mathbf{GAP}$$

Equação 10

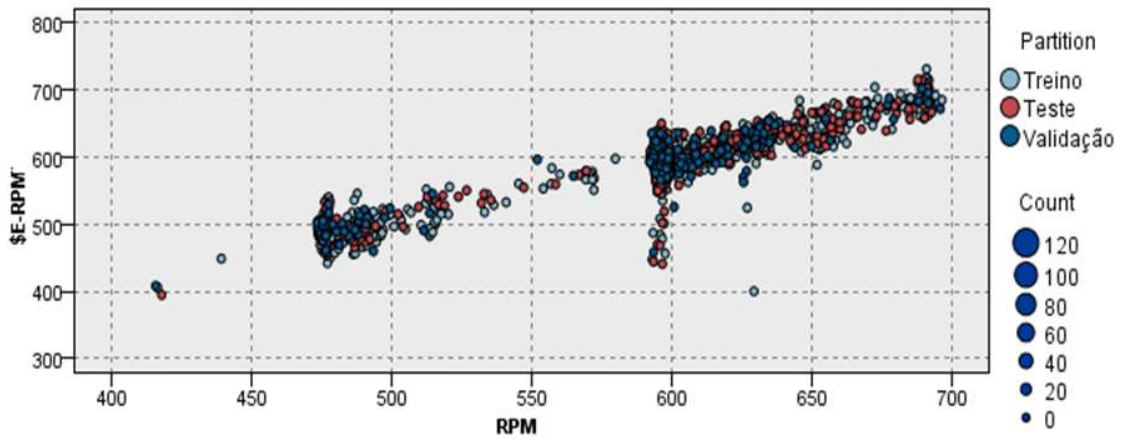
$$\mathbf{RMRM} = 617,8 + 0,7807\mathbf{TA} - 1,478\mathbf{CMRM} + 0,9664\mathbf{PRSSR} - 45,13\mathbf{GAP}$$

Equação 11

Na Figura 38 são avaliadas as Equações 10 e 11 apresentadas pela MRL. No eixo das ordenadas são apresentados os valores reais da rotação do motor do rolo fixo (RMRF) e na abcissa o valor simulado pela MRL. É a visualização gráfica do quanto o modelo apresenta linearidade, confirmando o modelo utilizado.

As cores representam a categoria dos dados, ou seja, se eles foram utilizados para treinar, testar ou validar o modelo. O diâmetro é a quantidade de pontos existentes dentro de um mesmo par ordenado, para visualizar a concentração de pontos como uma moda, por exemplo.

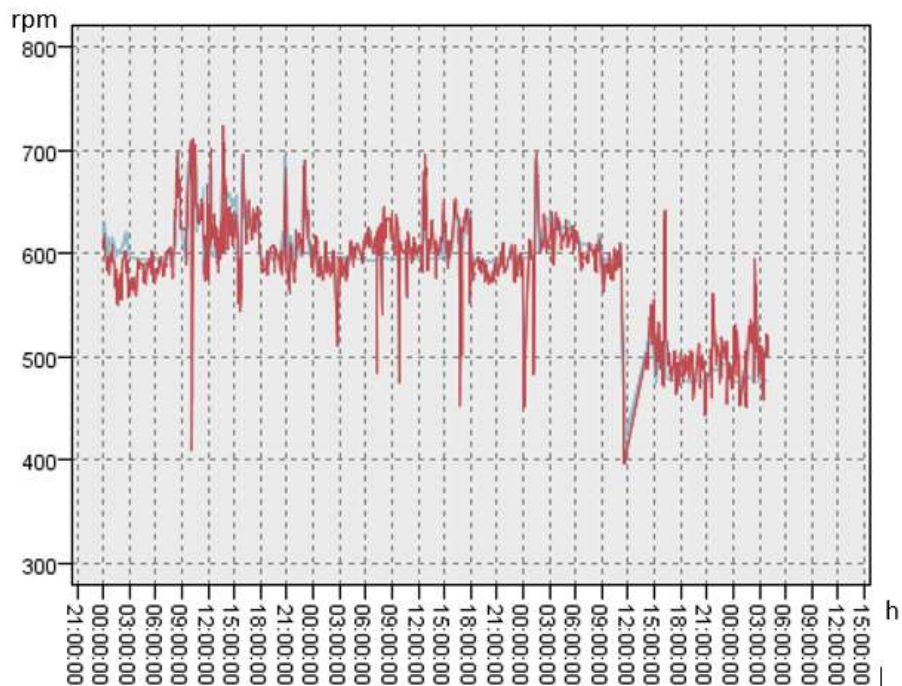
A linearidade do gráfico de correlação apresentado na Figura 38 demonstra que o modelo atende a HPGR.



**Figura 38** – Correlação da rotação do rolo prevista X rotação real.

Fonte: Produção do próprio autor.

Da mesma forma na Figura 39 é mostrado o gráfico temporal da rotação real (em azul) e a rotação predita (em vermelho) do motor do rolo fixo prevista pelo modelo e representada pela Equação 10. O resultado apresenta valores coincidentes, confirmando também a aplicabilidade do modelo a HPGR.



**Figura 39** – Série temporal da rotação do rolo prevista X rotação real.

Fonte: Produção do próprio autor.

### 5.3 Definição da Rotação Mínima para Operação da HPGR

Os resultados dos testes do item 5.2 mostraram que, para os cenários 5, 6, 9 e 10, dependendo das variáveis de entrada como taxa de alimentação, pressão e outras, é possível operar a HPGR com rotações inferiores a 50% da nominal (valor pré-fixado desde a implantação) com correntes dos motores dentro dos valores nominais, e sem desarmes da HPGR, resultando na formação de coluna e melhor ganho de granulometria.

As equações lineares da rotação do motor do rolo fixo (RMRF) e rotação do motor do rolo móvel (RMRM), Equações 10 e 11 respectivamente, fornecidas pela MRL, conforme item anterior, representam as rotações reais dos motores dos rolos da HPGR.

Uma das variáveis de entrada dessas equações é a corrente do motor do rolo, sendo (CMRF) para o rolo fixo, e (CMRM) para o rolo móvel. O maior valor aplicado para essas variáveis, sem comprometer a integridade dos motores, é o valor nominal, e conforme Tabela 2 temos:

$$\mathbf{CMRF = CMRM = 304,4}$$

Equação 12

Aplicando a Equação 12 nas Equações 10 e 11, teremos:

$$\mathbf{RMRF_{min} = 147,83 + 0,8123TA + 1,392PRSSR - 48,92GAP}$$

Equação 13

$$\mathbf{RMRM_{min} = 167,90 + 0,7807TA + 0,9664PRSSR - 45,13GAP}$$

Equação 14

RMRF<sub>min</sub> e RMRM<sub>min</sub> representam as rotações mínimas dos motores do rolo fixo e rolo móvel respectivamente, que operam com correntes dos motores dentro dos valores nominais, portanto sem desarmes da HPGR, e dependendo das demais variáveis, geram formação de coluna na HPGR.

Para o sistema de controle, quando ocorrer o acréscimo do nível do minério na coluna alimentadora, será solicitado ao motor que eleve a sua rotação para reduzir o nível do minério da coluna e atender o *setpoint* informado pelo operador. Se o motor já estiver na corrente nominal, Equação 12, o inversor para proteger o motor irá limitar essa corrente nesse valor nominal, impedindo a elevação da rotação e causando o transbordo da coluna alimentadora.

Para não permitir essa condição, será utilizado uma margem de segurança de 10% para a corrente do motor:

$$\mathbf{CMRF = CMRM = 0,9 * 304,4 = 273,96}$$

Equação 15

Aplicando a Equação 15 nas Equações 10 e 11, teremos as novas rotações mínimas dos motores do rolo fixo,  $\mathbf{RMRFmin}$ , e rolo móvel,  $\mathbf{RMRMmin}$ :

$$\mathbf{RMRFmin = 194,62 + 0,8123TA + 1,392PRSSR - 48,92GAP}$$

Equação 16

$$\mathbf{RMRMmin = 212,89 + 0,7807TA + 0,9664PRSSR - 45,13GAP}$$

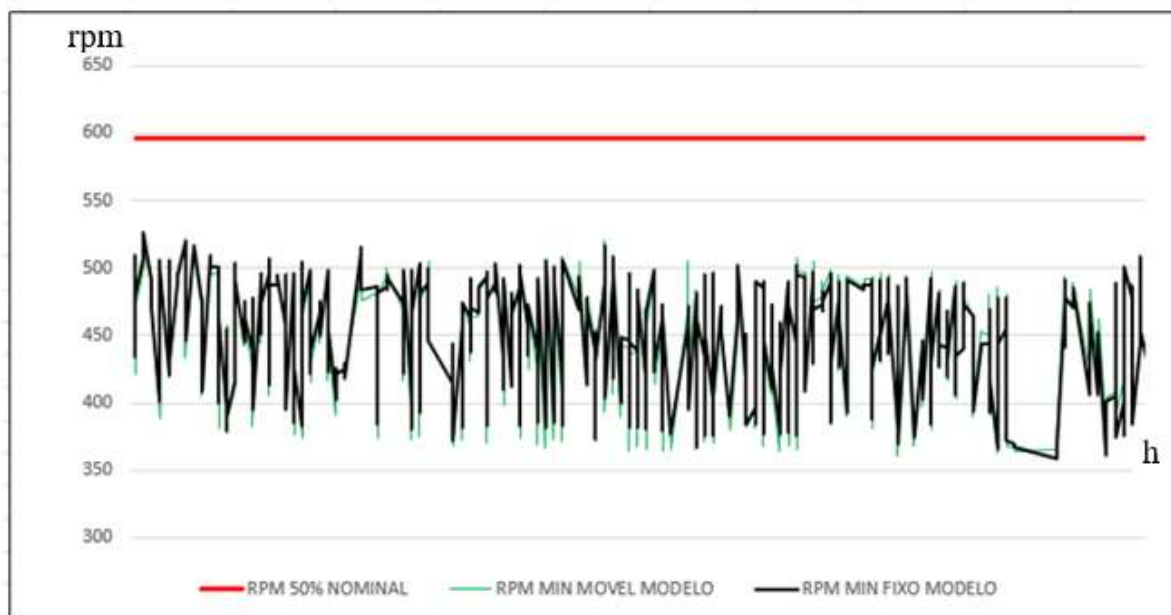
Equação 17

Essas rotações mínimas permitirão ao motor um degrau de torque ao receber o comando para aumentar a rotação.

#### **5.4 Resultado Preliminar da Aplicação da MRL na HPGR**

As Equações 16 e 17 foram inseridas no sistema de controle da HPGR em testes controlados. O resultado, apresentado na Figura 40, mostra no eixo das ordenadas um intervalo entre a rotação mínima de 596 rpm, pré-fixada desde a implantação, e a rotação mínima obtida pela modelagem nos rolos móvel e fixo. No eixo das abcissas o período do teste.





**Figura 40** – Rotação mínima fixa X modelagem.

Fonte: Produção do próprio autor.

Esse intervalo, definido pelas diferenças entre as rotações pré-fixada desde a implantação e a rotação mínima obtida pela modelagem nos rolos, representa oportunidade de formação de coluna sobre os rolos da HPGR. Foram registradas diferenças superiores a 220 rpm entre essas rotações. Esse cenário acontece principalmente com baixas taxas de alimentação e baixas correntes nos motores. Ganhos menores, mas significativos, foram obtidos em todas as demais faixas de taxa de alimentação da HPGR.

Dentro do conjunto de preditoras selecionadas, a taxa de alimentação é a que provoca maior variação nas rotações dos rolos.

O modelo apresentou erros no teste para taxas inferiores a 400 t/h, portanto foi limitado o sistema para teste com taxas de alimentação superiores a 450 t/h, mas essa limitação não apresenta perdas para a HPGR, pois a sua operação ocorre em sua maioria com uma taxa superior a esse valor.

Durante o período de teste operando com as rotações mínimas dos motores do rolo fixo, RMRFmin, e rolo móvel, RMRMmin definidas pelas Equações 16 e 17, foi registrado nível de coluna na alimentação da HPGR e trabalho dinâmico dos cilindros hidráulicos.

Foram medidos ganhos de superfície do material superior a 430 cm<sup>2</sup>/g entre o material antes e após a prensagem.

## 6. Conclusão

### 6.1 Avaliação dos Resultados

Desde o conceito de cominuição, palavra derivada do latim *comminueres*, que significa fazer menor, e o conhecimento de todas os equipamentos que trabalham para realizar essa quebra de materiais, em especial a Prensa de Rolos de Alta Pressão, *High Pressure Grinding Rolls* – HPGR, como uma das etapas importantes do processo de aglomeração de pellet feed via processamento térmico, conhecido como Pelotização, são importantes para o entendimento dos resultados alcançados por essa dissertação.

A formação de coluna de minério de ferro sobre os rolos da HPGR favorece a distribuição uniforme do material sobre os rolos, realizando a quebra das partículas de uma forma predominantemente autógena, importante para a qualidade do produto cominuído.

A não formação de coluna contribui para a variabilidade do ganho da HPGR, variabilidade no pelotamento e perda de produtividade da moagem. Também contribui para a não distribuição uniforme do material sobre os rolos, causando desgastes desiguais nas superfícies dos rolos.

A HPGR 3PR7 desde a sua implantação em 2008 não permitia a formação de coluna, decorrente de sua elevada rotação dos rolos. Essa limitação operacional causava alta variabilidade de ganho.

A realização de testes controlados no próprio equipamento por equipe multidisciplinar, em 13 cenários, alterando as variáveis taxa de alimentação, pressão aplicada e rotação dos rolos, foi utilizada para quantificar essa limitação operacional. Os resultados dos testes mostraram que alguns cenários, dependendo dessas variáveis, é possível a formação de coluna com correntes dos motores dentro dos valores nominais e apresentando melhores ganhos para a HPGR.

A Modelagem por Regressão Linear, através do *software* IBM SPSS Modeler, foi utilizada como metodologia para definição das equações lineares da rotação mínima dos motores dos rolos fixo e móvel da HPGR. Na aplicação dessas equações no sistema de controle da HPGR foi registrado nível de coluna na alimentação da HPGR e trabalho dinâmico dos cilindros hidráulicos.

Os ganhos de superfície superiores a 430 cm<sup>2</sup>/g, obtidos na aplicação do modelo no sistema de controle da HPGR 3PR7, representam a assertividade do modelo instalado. Significa para o processo:

- Melhor qualidade da pelota.
- Maior produtividade e redução do consumo energético nos moinhos.
- Melhor uniformidade das pelotas pela redução de carga circulante no pelotamento.
- Redução do desgaste dos rolos.

Os resultados capacitam a implementação definitiva do modelo ao sistema de controle da HPGR 3PR7.

Entretanto, essa solução proposta não atende a solução completa para as limitações operacionais, causadas pela rotação nominal dos motores ser muito superior ao necessário para esse processo, mas apresenta uma operação otimizada e dinâmica, pois considera o valor atual das variáveis de controle: pressão específica aplicada, corrente dos motores, taxa de alimentação, nível de coluna e outras.

Para a solução definitiva das limitações pode-se citar as seguintes soluções:

- Circuito de realimentação do minério visando o aumento da taxa de alimentação, permitindo aos motores operarem com uma rotação superior e que permita formação de coluna em sua alimentação.
- Substituição dos 2 motores por outros de maior número de polos e rotação inferior aos atualmente instalados.
- Modificação da relação de transmissão dos redutores.

Essas soluções requerem investimentos onerosos e disponibilidade do equipamento para instalação.

A solução apresentada pela modelagem não possuiu custo para instalação, foi de fácil implementação e não requereu parada de usina para implantação.

## **6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Há muitas oportunidades ainda a serem desenvolvidas nos sistemas de controle de equipamentos acionados por inversores de frequência, sejam em aplicações diretas como as registradas em ventiladores, bombas, correias transportadoras e outros, bem como em topologias mestre-escravo presentes nas HPGR.

Ainda na HPGR 3PR7 e demais instaladas nas usinas de pelotamento, são identificadas outras oportunidades de estudos que otimizam os seus ganhos, melhoram a eficiência energética e oferece condições mais seguras para os equipamentos e usuários.

Especificamente para a limitação operacional da HPGR 3PR7 os seguintes estudos irão complementar a solução apresentada nessa dissertação:

- Ganho de torque através da sobre-excitação do fluxo dos motores elétricos.
- Ganho de torque através da modelagem térmica do motor e utilização de sua curva de capacidade.

### **6.3 Considerações Finais**

A atividade desenvolvida e apresentada nessa dissertação é resultado de mais de três anos de inconformismo, investigação, persistência, inovação, interação, trabalho em grupo, sucesso, trabalho e fé.

Inconformismo pois não aceitou a situação de limitações operacionais da HPGR 3PR7 causadas pela elevada rotação dos rolos, registradas desde a sua implantação em 2008, que não permitia a formação de coluna sobre os rolos e causando alta variabilidade de ganho.

Investigação, pois foi realizado através de métodos para identificação da causa das limitações e quantificar essas influências das variáveis de processo, avaliando os resultados dos treze cenários operacionais na HPGR 3PR7.

Persistência para superar os insucessos e recomeçar algumas, ou várias vezes.

Inovação por andar em novos caminhos, ou mesmo por caminhos já trilhados, mas com novas visões.

Interação entre Empresa (e seus equipamentos e processos industriais) e Universidade (e suas teorias, modelos e fórmulas), nesse desenvolvimento Vale e UFES respectivamente, provando que essa parceria agrega valor para ambos e deve sempre ser compartilhada.

Trabalho em grupo, com suas especialidades e formações, pois ninguém é possuidor de todo o conhecimento e todos aprendem e contribuem para o crescimento dos outros. Participaram desse trabalho desde PhD até operadores formados pela extensa escola da vida.

E o sucesso da atividade ocorreu exatamente pois todos, do PhD até os operadores, bem alinhados, sabiam da sua valorosa importância e que todas as etapas foram importantes e valeram cada minuto dedicado.

O sucesso foi resultado de muito trabalho, mas motivado pela fé, que mostrava que apesar de todas as dificuldades, era possível alcançar esse sucesso.

## Referências Bibliográficas

ABB, Medium Voltage AC Drive Manual. Model 301/302 ACS1000, 12 pulses, 2005.

ADELMAN, I.; GREER, M. & MORRIS, C.T.:“Instruments and Goals in Economic Development”. American Economic Review, 59(2), 409-426, 1969.

A. E. FITZGERALD, CHARLES KINGSLEY, JR AND STEPHEN D. UMANS: “Electric Machinery”, Mc Graw, Hill, 2003

ALSMANN, L.;1996, KHD Humboldt Wedag, New roller press series characterized by enhanced reliability, Aufbereitungs -Technik/Mineral Processing, Nr.6, June 1996, pp 259-268.

ALVES, VLADMIR KRONEMBERGER ALVES. Metodologia para Simulação e Escalonamento de Prensas de Rolos. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2012.

BERALDO, J. L. Moagem de minérios em moinhos tubulares. São Paulo: Edgard Blucher, 1987

BROECKMANN, C.; GARDULA, A.; Reprint of: Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors, Ottawa, Janeiro 2005, p.285-299.

BURCHARDT, E. High Pressure Grinding Tests on Friable Itabirites from Serra do Sapo Mine. Polysius Research Centre. Alemanha: 2007

CHAVES, A. PERES, A Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. p.425-489, Brasil, 2003

CHAVES, A. PERES. - Moagem, Espessamento e Filtragem - Curso de Especialização em Sistemas Mínero-Metalúrgicos. Valer, Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.

DUNNE, R., 2006. HPGR – The journey from soft to competent and abrasive, SAG 2006, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 190-205.

FIGUEIRA, E.V.O, & ALMEIDA, S.L.M, Luz, A.B. Cominuição. Capítulo 4. Rio de Janeiro/2004 – CT2004 – 182 – 00. In Cominuição Técnica Elaborada para a 4º Edição do Livro de Tratamento de Minérios. 4ª edição. p. 113-194.

FOGLIATTO, F.S.; ALBIN, S.L. & TEPPER, B.J.: “A Hierarchical Approach to Optimizing Descriptive Analysis Multiresponse Experiments”. Journal of Sensory Studies Vol.14(4), Oct-Dec 1999, forthcoming.

FREITAS, LAMARTINE da SILVA. Avaliação dos minérios itabiritos compactos e semi-compactos em um circuito de britagem da Samarco Mineração S/A. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2014

GARIGLIO, E; KLEIN, M. Pelotização de Minérios de Ferro, Cap. 2. In: BRAGA, R. N. B. (coord.) – Aspectos Tecnológicos Relativos à Preparação de Carga e Operação de Alto-forno. São Paulo: ABM –DIRMA, set. 1993. p 100-160.

GOMES, FREDERICO BOMTEMPO, A prensa de rolos como alternativa para os circuitos de cominuição nas atividades de mineração e a viabilidade de sua aplicação. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2010.

HUKKI, R. T. Proposal for a solomonic settlement between the theory of von Rittinger, Kick and Bond. Transactions AIME, v. 220, p. 403-408, 1961.

JOHNSON, R.A. & WICHERN, D.W.: Applied Multivariate Statistical Analysis. 3rd Ed., Prentice Hall, New Jersey, 1992.

KING, R. P. Modeling and simulation of mineral processing systems. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001.

- KLYMOWSKY, RENE; PATZELT NORBERT; KNECHT, JOHANN AND BURCHARDT, EGBERT, "Selection and Sizing of High Pressure Grinding Rolls", Krupp Polysius AG, Beckum, Germany, 2004.
- KLYMOWSKY, R. et al. Selection and sizing of high pressure grinding rolls. In: KAWATRA, S. K. (Ed.). *Advances in comminution*, Littleton: SME, 2006. p. 636-668.
- LUZ, A. B. et al. *Tratamento de minérios*. 3. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002.
- MONTGOMERY, D.C. & PECK, E.A.: *Introduction to Linear Regression Analysis*. 2nd Ed., John Wiley, New York, 1992.
- MONTGOMERY, D.C., *Introduction to Statistical Quality Control*, 4th edition, John Wiley and Sons. 2001
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C., "Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros", LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2 ed., 2003.
- MORLEY, C. High pressure grinding rolls - a technology review. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME). Estados Unidos da América: 2006.
- NETER, J.; WASSERMAN, W.; WHITMORE, G. A. *Applied statistics*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992. p. 463-466.
- NEUMANN, E. W. Some basics on high-pressure grinding rolls. In: KAWATRA, S. K. (Ed.). *Advances in comminution*, Littleton: SME, 2006. p. 41-49.
- OLIVEIRA, RENATO NUNES MARTINIANO DE. *Análise de desempenho do HRC HPGR em circuito piloto*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2016.
- OTTE, O., 1988. *Polycom high pressure grinding principles and industrial application.*, Third Mill Operators' Conference. AusIMM, Cobar NSW, pp. 131-136.

OUTOKUMPU. Grinding Technology [online]. Finland: [cited 4 July 2002]. Available from Internet: <<http://www.outokumpu.fi/mineralprocessing/grind-1b.htm>>.

PENA, ELOISIO QUEIROZ; MAFRA, WASHINGTON LUIZ; DUTRA, EIDER REIS. Curso de Especialiação em Sistemas Mínero-Metalúrgicos. Valer, Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.

PEREIRA, C. E. Moagem. In: Peres, A.E.C.; PEREIRA, C. E. da SILVA, J. M. de Araujo, A.C., Curso de Beneficiamento de minérios. Belo Horizonte: 1989

POLYSIUS. Manual de Operação e Manutenção da HPGR 3PR7. 2008.

PYKE, P.; JOHANSEN, G.; ENGLISH, D.; IANE, G.; HAYWARD, T.; GARDULA, A.; Application of HPGR Technology in Processing Gold Ore. Vancouver: University Of British Columbia, 2006. p. IV-80 IV-93.

SAMPAIO, J. A.; DELBONI JÚNIOR, H. Cominuição. In: FERNANDES, F. R. C. et al (Ed.). Tendências tecnológicas Brasil 2007: Geociências e tecnologia mineral. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Parte 2, cap. 2, p. 103-131.

SCHÖNERT, K. A First Survey of Grinding with High-Compression Roller Mills, International Journal of Mineral Processing, 22: 401-412. 1988.

SCHUMACHER, M. AND THEISEN, W., 1997. HEXADUR , A novel wear protection of high pressure roller presses for comminution. No 11.5. Kipper.

VALE, Introdução a Pelotização de Minério de Ferro, Treinamento Interno, Brasil, 2010.

VALE, Prensa de Rolos de Alta Pressão (HPGR) para Minério de Ferro”, Treinamento Interno, Brasil, 2010.

VALERY, W & JANKOVIC, A. Closed circuit ball mill - basics revisited. Minerals Engineering, v. 43-44, p. 148-153, 2013.



VAN DER MEER, F. P.; MAPHOSA, W. High pressure grinding moving ahead in copper, iron, and gold processing. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 112, n. 7, p. 637-647, 2012.

WEG, “DT-6 Motores Elétricos de Indução trifásicos de alta tensão”, Brasil, 2011.

WEIR MINERALS AND KHD HUMBOLDT WEDAG, “Primeira Escolha para Tecnologia e Serviços com Prensa de Rolos de Alta Pressão”, 2010.

WILLS, B. A.; *Mineral Processing Technology*. 5th Edition. Oxford: Pergamon Press, 1992. 855p.

WILLS, B. A.; ATKINSON, K. Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies. *Minerals Engineering*, v. 6, n. 7, p. 697-706, July 1993.

WILLS, B. A.; NAPPIER-MUNN, T. J. *Wills' mineral processing technology: an Introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7th. ed. Amsterdam: Elsevier, 2006. 444 p.

## Anexo 1: Tipo de Britadores

Apresentação e classificação de britadores de acordo com Figueira & Almeida, 2004.

Destacam-se nesse grupo os principais tipos de britadores:

- Britadores de mandíbula;
- Britadores giratórios;
- Britadores de impacto;
- Britadores de rolos.

Normalmente, para haver uma liberação satisfatória do mineral valioso, é necessário que o minério seja reduzido a uma granulometria fina. Nestas condições, a fragmentação desenvolve-se por meio de três estágios, isto é, grossa, intermediária e fina ou moagem. Nos dois primeiros estágios a fragmentação é realizada em britadores, e no último estágio, em moinhos.

Não há rigidez quanto aos estágios de britagem, porém, normalmente se usa a classificação mostrada na Tabela 3 abaixo:

**Tabela 3** - Classificação dos estágios de britagem

| <b>Estágio de Britagem</b> | <b>Alimentação (mm)</b> | <b>Produto (mm)</b> |
|----------------------------|-------------------------|---------------------|
| Britagem Primária          | 1000                    | 100                 |
| Britagem Secundária        | 100                     | 10                  |
| Britagem Terciária         | 10                      | 1                   |
| Britagem Quaternária       | 5                       | 0,8                 |

Fonte: Figueira & Almeida, 2004

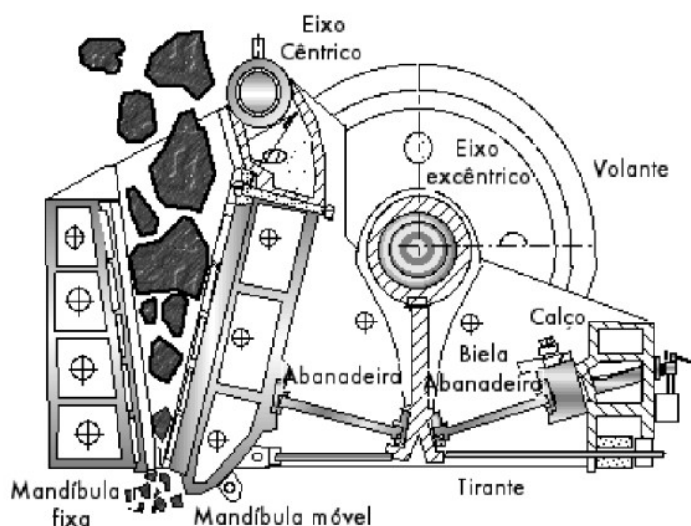
### 1.1 Britador de Mandíbulas

É o equipamento utilizado para fazer a britagem primária em blocos de elevadas dimensões/dureza e com grandes variações de tamanho na alimentação. Compõe-se basicamente de uma mandíbula fixa, e outra móvel ligada ao excêntrico (esta ligação pode ser feita direta ou indireta), que fornece o movimento de aproximação e afastamento entre elas. Desta maneira o bloco alimentado na boca do britador vai descendo entre as mandíbulas enquanto recebe o impacto responsável pela fragmentação.

Os britadores de mandíbulas são classificados em dois tipos, baseando-se no mecanismo de acionamento da mandíbula móvel. Assim, têm-se britadores de um eixo e dois eixos - tipo Blake. Nos britadores de dois eixos, a mandíbula móvel tem movimento pendular, enquanto que os de um eixo tem movimento elíptico. Em termos de custos, britadores de dois eixos são cerca de 50% mais caros que os de um eixo, sendo indicados para materiais mais abrasivos e de difícil fragmentação.

A especificação dos britadores de mandíbulas é dada pelas dimensões de abertura da alimentação. Por exemplo, um britador com 1.000 por 1.200 mm apresenta boca retangular com dimensões de 1.000 por 1.200 mm.

A granulometria do produto é estabelecida pelo ajuste da descarga, sendo então definida pela razão de redução que deve ser em torno de 5:1.



**Figura 41** - Desenho esquemático de um britador de mandíbulas e seus componentes.

Fonte: Figueira & Almeida, 2004

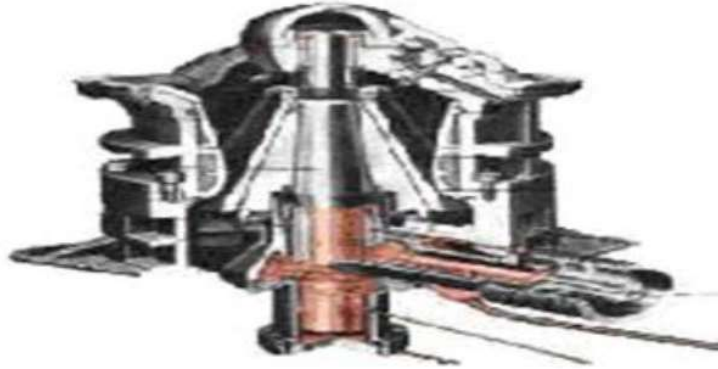
## 1.2 Britador Giratório

É o equipamento de britagem primária utilizado quando existe uma grande quantidade de material a ser fragmentado, sendo mais operacional do que o britador de mandíbulas, pois pode ser alimentado por qualquer lado, indistintamente, além de permitir uma pequena armazenagem no seu topo.

O princípio de funcionamento do britador giratório consta do movimento de aproximação e distanciamento do cone central em relação à carcaça invertida. Este movimento

circular (85 a 150 rpm) faz com que toda a área da carcaça seja utilizada na britagem, o que fornece ao britador uma grande capacidade de operação.

Esse britador tem baixo custo operacional e grande seção de alimentação.



**Figura 42** - Desenho esquemático de um britador giratório.

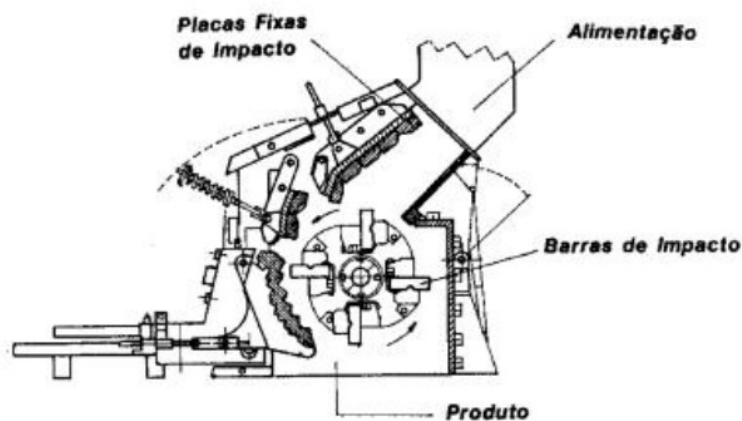
Fonte: Figueira & Almeida, 2004

### 1.3 Britador de Impacto

Neste tipo de britador, a fragmentação é feita por impacto ao invés de compressão. Por meio do movimento das barras (500 até 3.000 rpm), parte da energia cinética é transferida para o material, projetando-o sobre as placas fixas de impacto onde ocorre a fragmentação.

A desvantagem do uso desse equipamento é que apresenta elevado custo de manutenção e grande desgaste, não sendo aconselhável seu uso no caso de rochas abrasivas e de materiais com valor da sílica equivalente maior que 15%.

Estes equipamentos são escolhidos para britagem primária, onde se deseja uma alta razão de redução e alta percentagem de finos.



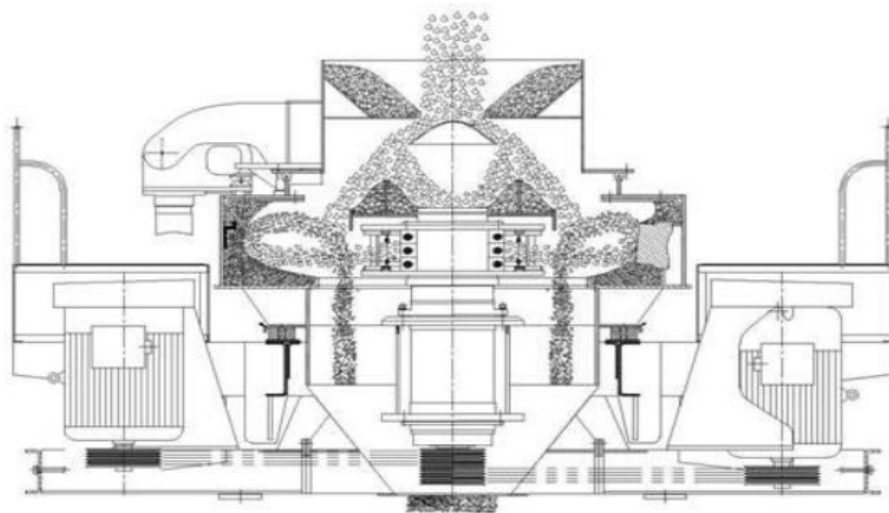
**Figura 43** - Desenho esquemático de um britador de impacto.

Fonte: Figueira & Almeida, 2004

## 1.4 Britadores de Impacto Vertical

O britador de impacto vertical é conhecido como o equipamento capaz de produzir modificações nas partículas, dando-lhes formato cúbico ou arredondado. Essa forma das partículas é atribuída aos mecanismos que ocorrem no rotor e na câmara de britagem do britador: impacto, abrasão e atrito. Parte do material alimentado no britador vai para o interior de um rotor, que projeta esse material a altas velocidades contra as paredes da câmara revestida com o próprio material onde as partículas colidem entre si e são moídas. Parte do material passa por fora do rotor, na forma de cascata e colide contra as partículas que passaram pelo interior do rotor, caracterizando-se como um processo autógeno de cominuição.

O cascadeamento das partículas traz os seguintes benefícios: redução do consumo de energia no processo; redução do consumo de peças de desgaste; aumento da capacidade de processamento do britador e controle na distribuição granulométrica.

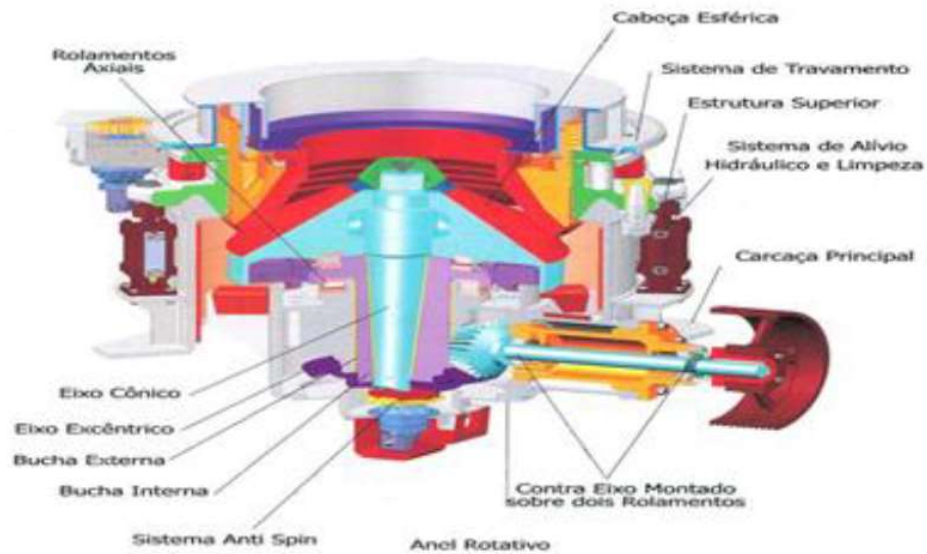


**Figura 44** - Desenho esquemático de um britador de impacto vertical.

Fonte: Figueira & Almeida, 2004.

## 1.5 Britador Cônico

O britador cônico possui o mesmo princípio de operação do britador giratório. Contrariamente ao que ocorre no britador giratório, no cônico, o manto e o cone apresentam longas superfícies paralelas, para garantir um tempo longo de retenção das partículas nessa região. No britador giratório a descarga se dá pela ação da gravidade, enquanto no cônico a descarga é condicionada ao movimento do cone. O movimento vertical do cone, para cima e para baixo, controla a abertura de saída, para tal, utilizam-se dispositivos hidráulicos.



**Figura 45** - Desenho esquemático de um britador cônico hidráulico.

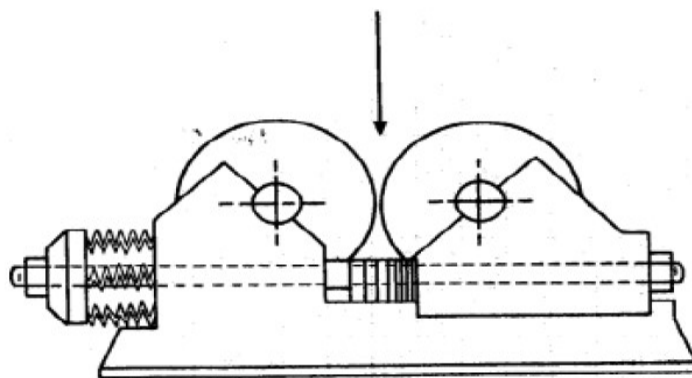
Fonte: Figueira & Almeida, 2004

## 1.6 Britador de Rolos

Este equipamento consta de dois rolos de aço girando à mesma velocidade, em sentidos contrários, guardando entre si uma distância definida. São destinados a materiais friáveis ou de fácil fragmentação.

A alimentação é feita lançando-se os blocos de minério entre os rolos cujo movimento faz com que os mesmos sejam forçados a passar pela distância fixada previamente por parafusos de ajuste. Esta ação promove a fragmentação dos blocos.

Este tipo de britador possui uma forte limitação quanto à granulometria da alimentação, pois a mesma é limitada pela distância fixada entre os rolos e os diâmetros dos mesmos.



**Figura 46** - Desenho esquemático de um britador de rolos.

Fonte: Figueira & Almeida, 2004

## 1.7 Britador de Rolo Dentado

Consiste basicamente de um rolo dentado móvel e uma carcaça fixa. O movimento giratório do rolo provoca a compressão e cisalhamento do material entre os dentes e a placa fixada à câmara.

Tem emprego limitado devido ao grande desgaste dos dentes, por ser sensível à abrasão. É aconselhável sua aplicação para rochas de fácil fragmentação e também para britagens móveis, dada às pequenas dimensões do equipamento. Possui alta tolerância à umidade da alimentação, sendo, na britagem primária, o equipamento que produz menos finos.



Figura 47 - Desenho esquemático de um britador de rolo dentado.

Fonte: Figueira & Almeida, 2004

## Anexo 2: Variáveis de Processo de uma HPGR

### 2.1 Ângulos de Intertravamento e Compressão

De acordo com Klymowsky et al. (2006), os ângulos de intertravamento  $\sigma$  apresentado na Equação 18 e compressão máxima  $\alpha$ , o qual varia entre 6 e 10 graus mostrado na Equação 19, são funções, respectivamente, da densidade do floco, densidade da alimentação e da maior partícula.

$$\sigma = \arccos \left( 1 - \frac{(x_{\max}/S - 1) \cdot S}{1000 \cdot D} \right)$$

Equação 18

Onde:

$\sigma$  - Ângulo de intertravamento das partículas (rad)

$x_{\max}$  - Tamanho da maior partícula (mm)

S - Espessura do floco (mm)

D - Diâmetro do rolo (m)

$$\alpha = \arccos \left( 1 - \frac{\left( \frac{\delta_c}{\delta_f} - 1 \right) \cdot S}{1000 \cdot D} \right)$$

Equação 19

Onde:

$\alpha$  - Ângulo de compressão máxima (rad)

$\delta_c$  - Densidade do floco ( $t/m^3$ )

$\delta_f$  - Densidade aparente da alimentação ( $t/m^3$ )

S - Espessura do floco (mm)

D - Diâmetro do rolo (m)



## 2.2 Pressão Específica

A pressão específica apresentada na Equação 20 é definida como a força aplicada nos rolos (kN), dividida pelo diâmetro (m) e pela largura (m) dos rolos (SCHÖNERT, 1988).

$$P_{esp} = \frac{F}{1000 \cdot D \cdot L}$$

Equação 20

Onde:

$P_{esp}$  - Pressão específica (N/mm<sup>2</sup>)

F - Força aplicada nos rolos (kN)

D - Diâmetro do rolo (m)

L - Largura do rolo (m)

## 2.3 Pressão Máxima Entre os Rolos

A pressão máxima entre os rolos é definida como a pressão aplicada na zona de compressão do equipamento. Essa região varia para cada equipamento e para cada minério. Geralmente, seu valor é 40 a 60 vezes maior do que a pressão específica, sendo calculada pela Equação 21 (SCHÖNERT, 1988):

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{F}{1000 \cdot D \cdot L \cdot k \cdot \alpha}$$

Equação 21

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$  - Pressão máxima (N/mm<sup>2</sup>)

F - Força aplicada nos rolos (kN)

D - Diâmetro do rolo (m)

L - Largura do rolo (m)

K - Constante do material (0,18 - 0,23)

$\alpha$  - Ângulo de compressão máxima (rad)

## 2.4 Vazão Mássica

A vazão é calculada a partir do volume do produto multiplicado pela densidade do material na abertura entre os rolos (flocos). Calculada pela Equação 22.

$$M = L \cdot s \cdot u \cdot \delta_c \cdot 3,6$$

Equação 22

Onde:

M - Vazão mássica (t/h)

L - Largura do rolo (m)

s – Abertura Operacional - *GAP* (mm)

u - Velocidade periférica do rolo (m/s)

$\delta_c$  - Densidade do material na abertura da HPGR (t/m<sup>3</sup>)

Durante a operação, a abertura da HPGR é uma variável não controlável, sendo dependente das características do minério, principalmente granulometria de alimentação e tenacidade, e da HPGR, diâmetro e tipo de superfície dos rolos (MORLEY, 2010). A pressão operacional influencia inversamente a abertura operacional, ou seja, quanto maior a pressão, menor a abertura.

## 2.5 Vazão Mássica Específica

O cálculo da vazão mássica específica, ou capacidade específica, pode ser efetuado de duas formas, como mostrado em sequência.

### Cálculo a partir da relação s/D

A vazão mássica específica, Equação 23, é calculada a partir da relação entre a abertura operacional, *GAP*, (s) e o diâmetro do rolo (D), é função da densidade do produto (floco).

$$m_c = \frac{s}{D} \cdot \delta_c \cdot 3,6$$

Equação 23

Onde:

$m_c$  - Vazão mássica específica (t.s/m<sup>3</sup>h)

$s$  – Abertura Operacional - *GAP* (mm)

$D$  - Diâmetro do rolo (m)

$\delta_c$  - Densidade do material na abertura da HPGR (t/m<sup>3</sup>)

### **Cálculo a partir da alimentação**

A vazão mássica específica também pode ser calculada a partir da alimentação, conforme Equação 24, sendo função do diâmetro, da largura e da velocidade periférica do rolo (MORLEY, 2006a):

$$m_f = \frac{M}{D \cdot L \cdot u}$$

Equação 24

Onde:

$m_f$  - Vazão mássica específica (t.s/m<sup>3</sup>h)

$M$  - Vazão mássica (t/h)

$D$  - Diâmetro do rolo (m)

$L$  - Largura do rolo (m)

$u$  - Velocidade periférica do rolo (m/s)

## Anexo 3: Minério de Ferro e Pelotização

### 3.1 Minério de Ferro

O termo minério de ferro é utilizado para uma infinidade de materiais, não sendo possível associá-lo a um tipo específico. Do ponto de vista econômico pode-se dizer apenas que se refere a materiais que são explorados comercialmente em função do seu conteúdo de ferro.

Na Figura 48 temos um exemplo de uma mina de minério de ferro.



**Figura 48** – Mina de minério de ferro.

Fonte: Vale, Introdução a Pelotização de Minério de Ferro, Treinamento Interno, 2010

#### 3.1.1 Principais Minerais Portadores de Ferro

O ferro é encontrado em numerosos minerais, destacando-se a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), a goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), a siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), a pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e a ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ). Os principais minerais portadores de ferro são apresentados a seguir (Dana, 1974).

##### 3.1.1.1 Hematita - $\text{Fe}_2\text{O}_3$

A hematita é o mais importante mineral de ferro e, também, o mineral de maior significado encontrado nos minérios pré-cambrianos. Em termos químicos, a hematita é considerada como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  puro, com 69,94% de ferro e 30,06% de oxigênio.

### **3.1.1.2 Goethita - FeO(OH):**

A goethita é um mineral muito comum e se forma, sob condições de oxidação, como produto de intemperismo dos minerais portadores de ferro. Forma-se, também, como precipitado direto, inorgânico ou biogênico, sendo amplamente disseminado, como depósito em pântanos e fontes. Em termos químicos, a composição da goethita pode ser expressa da seguinte forma: 62,9% de ferro, 27,0% de oxigênio e 10,1% de água.

### **3.1.1.3 Magnetita - Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**

A magnetita é uma espinela (óxido duplo) e é componente essencial de muitas formações ferríferas. Em termos químicos, é usualmente considerada como Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> puro com 72,4% de ferro e 27,6% de oxigênio. No entanto, as magnetitas naturais, em virtude da extrema flexibilidade da estrutura atômica da espinela, contêm, usualmente, quantidades menores de elementos como Mg, Mn, Zn, Al, Ti e outros na sua estrutura. Quase que universalmente, a magnetita tende a apresentar granulação média, comumente muito mais grossa que quartzo, hematita e silicatos de ferro, com os quais coexiste. A magnetita normalmente ocorre como octaedros, em camadas que se alternam com camadas silicosas nas formações ferríferas. A oxidação a baixa temperatura, frequentemente relacionada à lixiviação ou movimento do lençol d'água, usualmente converte o cristal de magnetita a grãos de hematita, conservando a morfologia octaédrica da magnetita. Essa forma de hematita é denominada martita, que é, portanto, pseudomorfa da magnetita. A martitização é um processo muito comum de formação de minério e é usualmente associada à disseminação das formações ferríferas bandadas, na produção dos minérios hematíticos.

## **3.1.2 Gênese dos Minérios de Ferro**

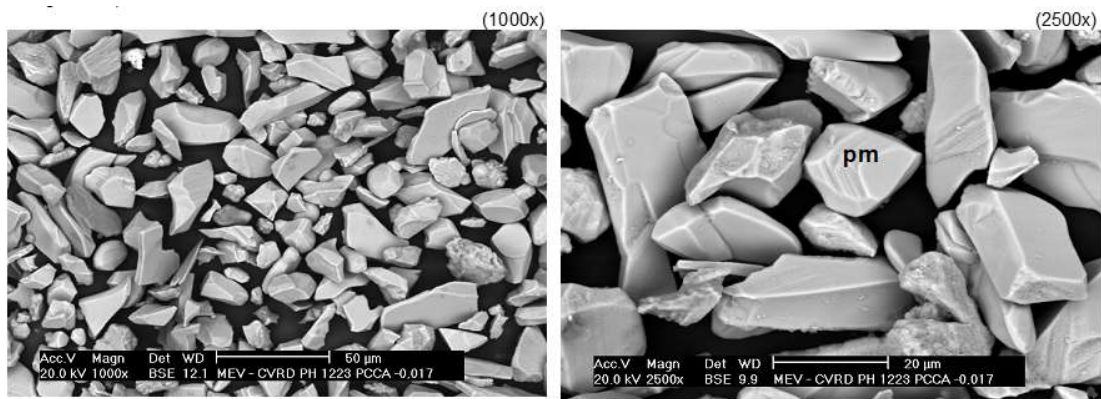
Quanto a origem, os minérios de ferro são classificados em Metassomáticos e Supergênicos.

### 3.1.2.1 Metassomáticos

As características dos Metassomáticos:

- Alto grau de metamorfismo;
- Crescimento e achatamento dos cristais;
- São minérios compactos e de coloração azulada;
- Possuem tamanhos de cristais de fino (0,01-0,04 mm) a grosso (0,22 mm);
- Pouco hidratados;
- Baixos teores de deletérios;
- Possuem alta crepitação (granulados), baixa redutibilidade, baixa moabilidade e fácil filtragem.

Na Figura 49, nas fotomicrografias são identificadas as características de minérios compactos e achatamento dos cristais.



**Figura 49** – Metassomáticos.

Fonte: Vale, Introdução a Pelotização de Minério de Ferro, Treinamento Interno, 2010

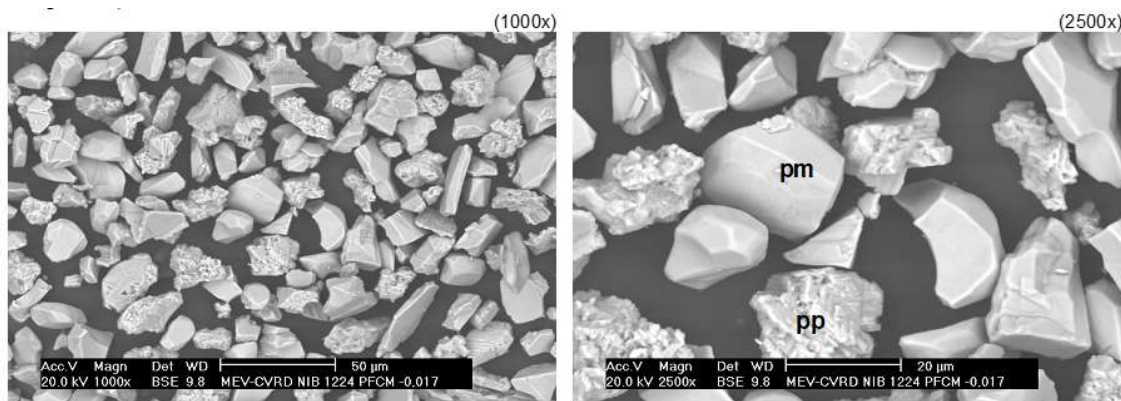
### 3.1.2.2 Supergênicos

As características dos Supergênicos:

- Baixo grau de metamorfismo;
- São minérios porosos e de coloração marrom;
- Possuem tamanhos de cristais de muito fino (inferior a 0,01 mm) a fino (0,01-0,04 mm);
- Muito hidratados;
- Altos teores de deletérios;

- Possuem baixa crepitação (granulados), alta redutibilidade, alta moabilidade e difícil filtragem.

Na Figura 50, são detalhadas as características de minérios porosos para os supergênicos.



**Figura 50** – Supergênicos.

Fonte: Vale, Introdução a Pelotização de Minério de Ferro, Treinamento Interno, 2010

### 3.2 Unidades de Beneficiamento

Após a extração do mineral na mina, ele não está pronto para ser entregue ao cliente. São necessários uma série de etapas e diversos procedimentos, que vão transformá-lo num produto de acordo com as exigências do mercado. Uma dessas etapas são realizadas nas Unidades de Beneficiamento. São realizadas as atividades típicas de beneficiamento de minérios, como pilha de homogeneização, peneiramento, lavagem, separação gravimétrica, separação magnética, flotação, tendo como objetivo o enriquecimento do teor de ferro metálico e remoção parcial de constituintes indesejáveis, chamado de ganga, como por exemplo  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , P, Mn, etc.

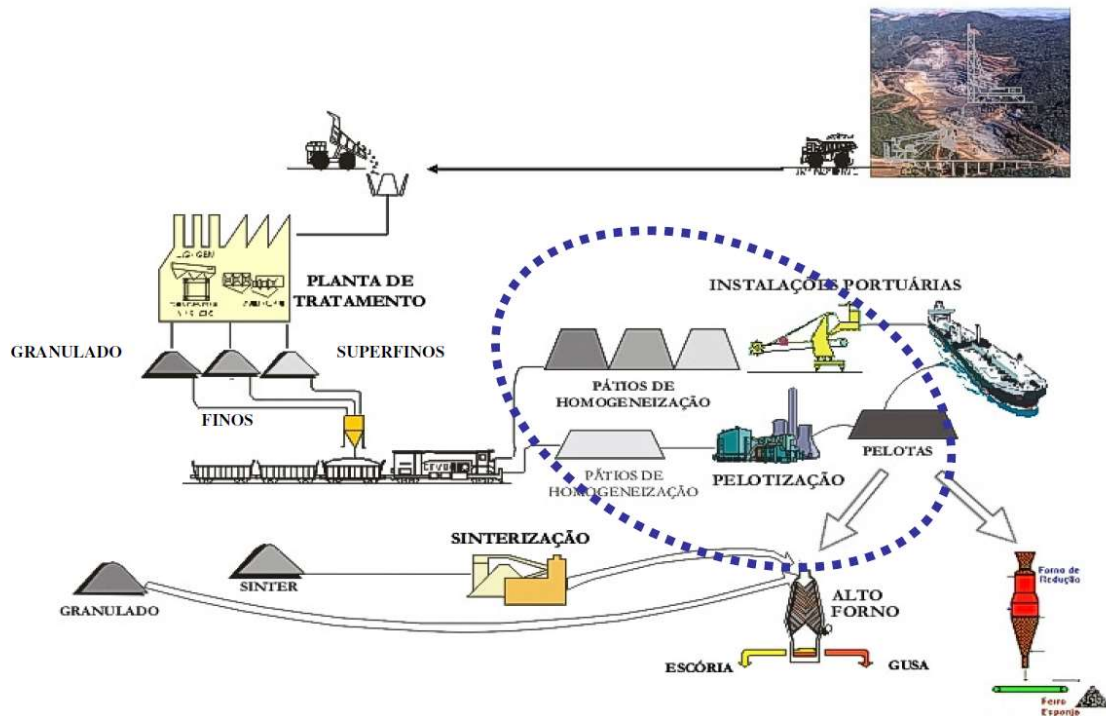
O produto após beneficiamento e classificação, é enviado para os clientes conforme a sua granulometria:

- Granulado - > 6mm: Destinado a alto forno ou reator de redução direta;
- *Sinter Feed* - < 6 mm e > 0,15 mm: Enviado para a sinterização e posteriormente para alto forno;
- *Pellet Feed* - < 0,15 mm: Transportado para usinas de Pelotização.

### 3.3 Pelotização

Pelotização é o processo de aglomeração de *pellet feed* via processamento térmico a temperaturas de até 1350°C, possibilitando o aproveitamento econômico dessa fração de partículas finas gerada nas minas e processadas nas unidades de beneficiamento.

A Figura 51 localiza a Pelotização dentro da cadeia do minério de ferro:



**Figura 51** – Localização da Pelotização na cadeia do minério de ferro.

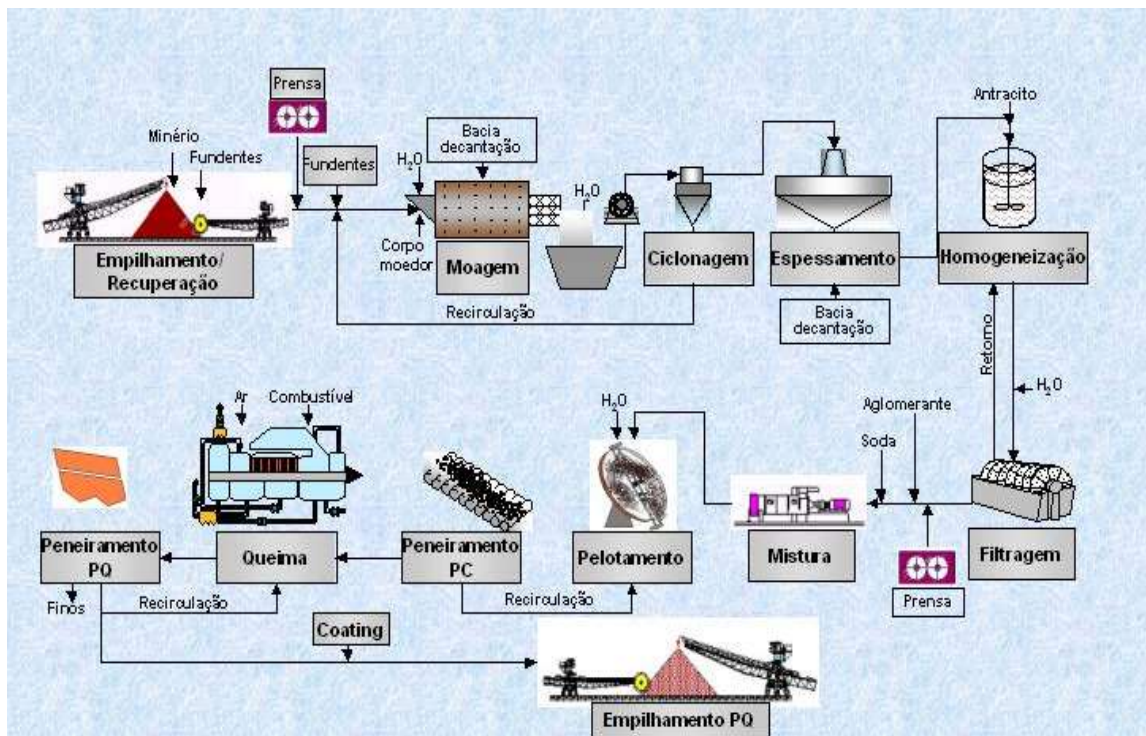
Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.

O *pellet feed* recebido das unidades de beneficiamento, com granulometria inferior a 0,15 mm é transformado em pelotas e enviada para o alto forno ou reator de redução direta da siderurgia, permitindo o ajuste da qualidade química e física e agregação de valor às cargas metálicas desses altos fornos e reatores de redução direta.



Desde a chegada do pellet feed ao envio das pelotas para o cliente, são muitas etapas. A Figura 52 mostra as etapas típicas que compõem o processo de pelletização de minério de ferro. São elas: Empilhamento e Homogeneização; Moagem e Classificação; Prensagem; Espessamento; Homogeneização; Filtragem; Adição de Aglomerante; Mistura; Pelotamento; Peneiramento; Queima; Peneiramento de Pelotas Queimadas; Empilhamento de Pelotas

Essas etapas serão apresentadas nos itens seguintes:



**Figura 52** – Etapas típicas que compõem o processo de pelletização de minério de ferro.

Fonte: Vale, Introdução a Pelotização de Minério de Ferro, Treinamento Interno, 2010

### 3.3.1 Empilhamento e Homogeneização

A homogeneização consiste na formação da pilha de finos de minério nos pátios das usinas de pelletização, antes da etapa da moagem.

A formação destas pilhas é fundamental para minimizar a flutuação das propriedades das diversas matérias-primas, decorrente das gêneses dos minérios. Nessa etapa também é realizada a adição de fundentes e combustíveis sólidos.

Na Figura 53 é apresentada um exemplo de pilha de finos de minério, que também serve como "pulmão", garantindo a continuidade operacional da usina.



**Figura 53** – Pátios de Finos e Recuperadoras de minério de ferro.

Fonte: Vale, Introdução a Pelotização de Minério de Ferro, Treinamento Interno, 2010

### **3.3.2 Moagem e Classificação**

A etapa de moagem realiza o ajuste das propriedades físicas (granulometria e superfície específica) da mistura de minérios às exigências do pelletamento.

É muito onerosa em consumo energético e melhorias realizadas nessa etapa trazem redução de custo ao processo de pelletização.

A moagem em moinhos de bolas, normalmente utilizados pelas usinas, tem um impacto significativo no volume e na superfície específica da “Polpa Retida” produzida.

Uma operação equilibrada e otimizada da moagem (considerando o circuito de alimentação do moinho, diluição da polpa na alimentação/descarga do moinho e pressão dos ciclones) é obtida através de sistema automatizado.

Na Figura 54 é apresentado um circuito de moagem composto por moinhos tubulares em circuito úmido e que utiliza bolas (ou *cylpebs*) como corpo moedor.



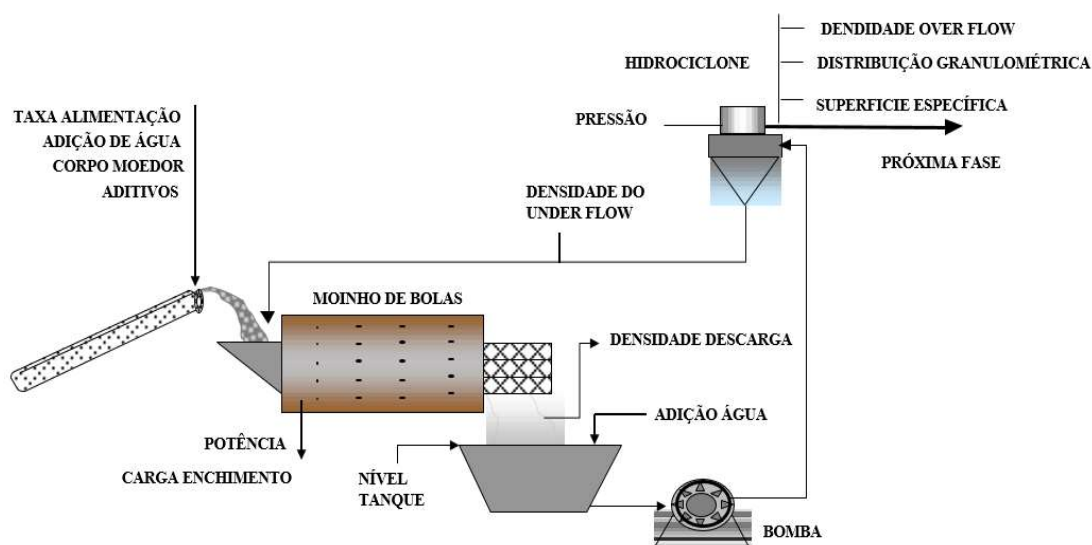
**Figura 54** – Moinhos de bolas em uma usina de Pelotização.

Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.

Após moagem é realizada a classificação por hidrociclones.

O princípio básico de separação empregado nos hidrociclones é a sedimentação centrífuga. A polpa de minério é injetada sob pressão na parte superior da câmara cilíndrica e, como resultado de sua entrada tangencial, é criado no seu interior um fluxo descendente em espiral ao longo das paredes internas do ciclone e um vórtice de baixa pressão ascendente na região central. Quando a polpa entra na câmara cilíndrica através do duto de alimentação, inicia-se uma rotação da suspensão no interior dessa câmara, causada por uma força centrífuga que acelera o movimento das partículas na direção das paredes. As partículas mais densas (*underflow*) migram para baixo, percorrendo uma espiral que tem início na parte cilíndrica e continua na parte cônica, sendo descarregadas pela base da parte cônica. No caso de partículas menores (*overflow*) e menos densas, são arrastadas por um movimento ascendente e saem por uma abertura superior.

O fluxo do minério na moagem e classificação é apresentada na Figura 55.



**Figura 55** – Fluxo de minério de ferro na etapa de moagem e classificação.

Fonte: Vale, Introdução a Pelotização de Minério de Ferro, Treinamento Interno, 2010

O *underflow* retorna para o moinho para uma nova cominuição. O *overflow* é bombeado para a próxima etapa, sendo o espessador para circuitos fechados, ou o tanque homogeneizador para circuitos abertos.

A etapa de moagem é muito onerosa em consumo energético e melhorias realizadas nessa etapa trazem redução de custo ao processo de pelotização.

### 3.3.3 Espessamento

O Espessamento é a etapa que é realizada o adensamento da polpa ciclona via princípio da sedimentação.

É a primeira etapa para desaguamento da polpa de minério de ferro separando a parte densa sedimentada (*underflow*) no fundo e um líquido clarificado (*overflow*) na parte superior, que retorna aos moinhos.

É composto por três fases: clarificação, sedimentação e compactação.

Na clarificação as partículas distantes umas das outras sedimentam praticamente sem interferência mútua.

Na sedimentação aumenta a concentração das partículas na polpa e cada partícula, em contato com vizinhas, desce em conjunto, aprisionando as demais e fazendo-as afundar com a mesma velocidade.

Na compactação: partículas são adensadas devido ao seu peso.

Essas fases são visualizadas na Figura 56.

As partículas sedimentadas são arrastadas bem lentamente até o centro do espessador onde serão bombeadas.



**Figura 56** – Espessador e Fases do Espessamento: Clarificação, Sedimentação e Compactação.

Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.

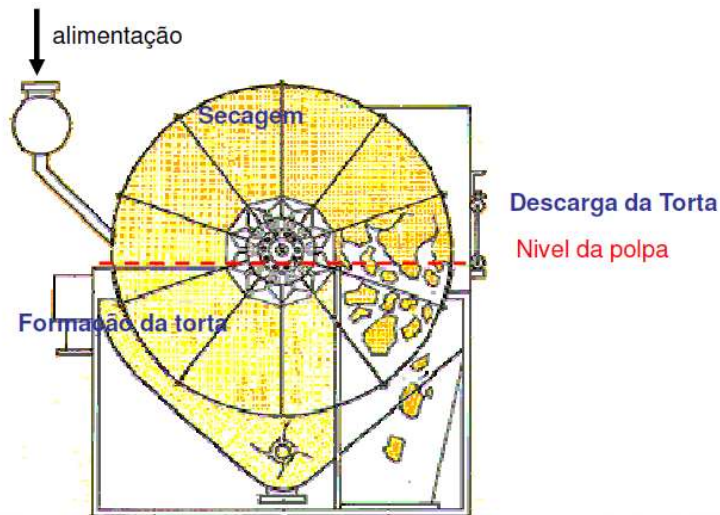
### 3.3.4 Homogeneização

Na homogeneização são mantidos os sólidos em suspensão e polpa homogeneizada em tanques com agitação mecânica através de um conjunto moto-redutor. Utilizada também como estoque intermediário de material e nessa etapa há, conforme o processo, possibilidade de adição de polpa de combustível sólido como antracito e coque de petróleo.

### 3.3.5 Filtragem

Filtragem: Retirada de umidade do material através de um meio filtrante e a retenção de sólidos. Essa etapa é requerida nas plantas com circuito de moagem a úmido.

Na Figura 57 é apresentado o filtro de disco rotativo a vácuo, amplamente utilizado na retirada de umidade da polpa de minério nas usinas de Pelotização.



**Figura 57** – Filtro de Disco Rotativo a Vácuo.

Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.

Na Figura 57 são apresentados os ciclos de operação:

- Formação da torta;
- Secagem
- Descarga ou sopro da torta;

A polpa alimenta a bacia do filtro e fica retida nos elementos filtrantes dos filtros ocorrendo a formação da torta.

Através da rotação, após os elementos filtrantes atingirem um limite superior ao nível da polpa, é realizado o segundo ciclo de operação, denominado de secagem, que através de pressão de vácuo é retirado a parte fluida da torta.

Esse material é retirado do elemento filtrante no terceiro ciclo por meio da pressão de sopro. O sopro ocorre de forma instantânea, como um “tiro”, possibilitando um movimento brusco de expansão dos elementos filtrantes permitindo o desprendimento mais eficiente da torta.

A Figura 58 apresenta uma bateria de filtros e a formação de torta no elemento filtrante.



**Figura 58** – Filtros de Disco Rotativo a Vácuo e Formação de Torta no Elemento Filtrante.

Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.

A Filtragem é uma etapa crítica para a Pelotização. A variável baixa umidade da polpa retida tem uma grande influência no desempenho do pelotamento, gerando pelotas “cruas” malformadas, granulometria fora das especificações requeridas e também formação de pelotas “cruas” com elevada plasticidade (resiliência). Além do impacto no pelotamento, a umidade da polpa retida tem influência considerável sobre o consumo de energia do forno de pelotização, afetando o custo final da queima.

Após a filtragem o minério é enviado para a próxima etapa da Pelotização.

### 3.3.6 Prensagem

A Prensagem é a tecnologia de cominuição com aplicação de altíssimas pressões específicas às partículas de minério e é realizada pela Prensa de Rolos de Alta Pressão, *High Pressure Grinding Rolls* (HPGR). A HPGR e o processo de cominuição já foram apresentados anteriormente dessa dissertação.

### 3.3.7 Adição de Aglomerante e/ou Fundentes

A adição de aglomerante ao minério permite a formação de pelotas cruas com resistência física suficiente para resistir ao trajeto pelotamento - forno e evitar a ocorrência de choque térmico na secagem.

Os principais tipos são:

- Inorgânicos: cal hidratada, bentonita;
- Orgânicos: CMC – carboximetilcelulose; HEC – heaetilcelulose; e PAM - poliacrilamida.

Os aglomerantes atuam através da formação de pontes de sais durante a secagem e aquecimento das pelotas.

A Bentonita é um material argiloso, tendo como principal mineral a montmorilonita, além de pequenas quantidades de quartzo, mica, feldspato e caulim. Possui estrutura lamelar com grande capacidade de retenção de moléculas de água entre as camadas possibilitando melhor controle da umidade das pelotas.

A cal hidratada é obtida via calcinação de calcário em fornos verticais, rotativos ou de leito fluidizado, possui alta superfície específica e além de funcionar como aglomerante, tem o efeito sobre a basicidade da pelota queimada.

Os aglomerantes orgânicos são compostos poliméricos (longas cadeias de carbono de alto peso molecular. Possuem vantagem de não incorporar contaminantes às pelotas, pois são decompostos durante o processamento térmico.

### 3.3.8 Mistura

A boa eficiência da mistura do minério com aditivos é importante para garantia da qualidade das pelotas cruas e redução dos desvios-padrão dos parâmetros de qualidade. Ganhos de eficiência de mistura podem implicar em reduções expressivas no consumo específico de aglomerantes.

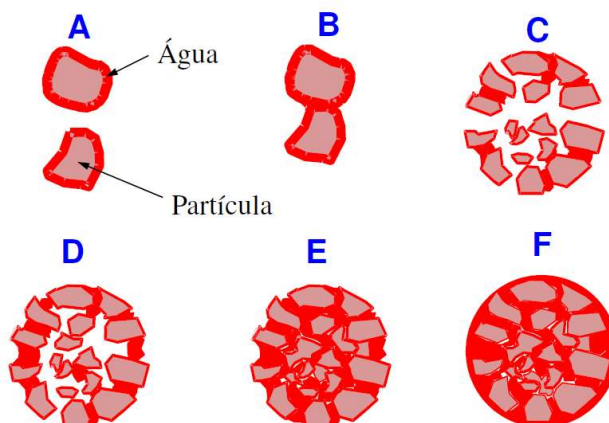
### 3.3.9 Pelotamento

Pelotamento é a etapa de formação de pelotas cruas com tamanho e resistência mecânica adequados à etapa de processamento térmico.



É realizado baseado na ação de forças capilares no sistema partículas de minério, água e ar.

A evolução da aglomeração de partículas, quando revolvidas em presença de água, ocorre em seis estágios, visualizados na Figura 59:



**Figura 59** – Aglomeração de Partículas na Presença de Água.

Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.

- Estágio A: Inicialmente as partículas são envolvidas por uma película de água contida na mistura úmida.
- Estágio B: Devido à tensão superficial, são formadas pontes líquidas, unindo partículas. Essas pontes líquidas, no misturador, tem um caráter transitório, ocorrendo sucessivas uniões e separações. No disco a tendência preferencial é no sentido da união.
- Estágio C: Continuando a movimentação da mistura, e pela presença de gotas individuais, formam-se os primeiros aglomerados. As primeiras pontes líquidas aparecem, mas os aglomerados são fracos, porque predominam os vazios. Este fenômeno, típico da operação do disco, ocorre também no misturamento.
- Estágio D: Incorporando mais água, mais pontes são formadas e os aglomerados se tornam mais densos e as forças capilares, crescentes.
- Estágio E: Todos os vazios preenchidos, sem que a água envolva toda a superfície da partícula. Assim, os níveis de umidade, correspondentes a esta etapa, são dependentes da quantidade e qualidade dos poros das partículas.

Estágio F: Partículas totalmente envolvidas pela água (predomina a tensão superficial da água, carregada de partículas sólidas, caindo drasticamente o efeito das forças capilares), tornando os aglomerados mais plásticos.

O bom desempenho do pelotamento depende de alguns fatores como:

- Granulometria e superfície específica da HPGR.
- Propriedades físicas e químicas do minério de ferro.
- Propriedades físicas e químicas e a quantidade de aditivos.
- Umidade do material alimentado nos discos.
- Taxa de alimentação de material nos discos.
- Quantidade de água adicionada nos discos.
- Inclinação dos discos.
- Posição dos raspadores e defletores e dos bicos "sprays" de água.
- Posição da área de alimentação dos discos.
- Limpeza na descarga do disco.
- Uniformidade da camada de fundo.

Pode-se observar que, de acordo com as variáveis citadas acima, o bom desempenho do pelotamento, quer seja disco (Figura 60), ou tambor (Figura 61), depende muito mais do desempenho das etapas anteriores do pelotamento.



**Figura 60** – Exemplo de Disco de Pelotamento.

Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.



**Figura 61** – Exemplo de Tambor de Pelotamento.

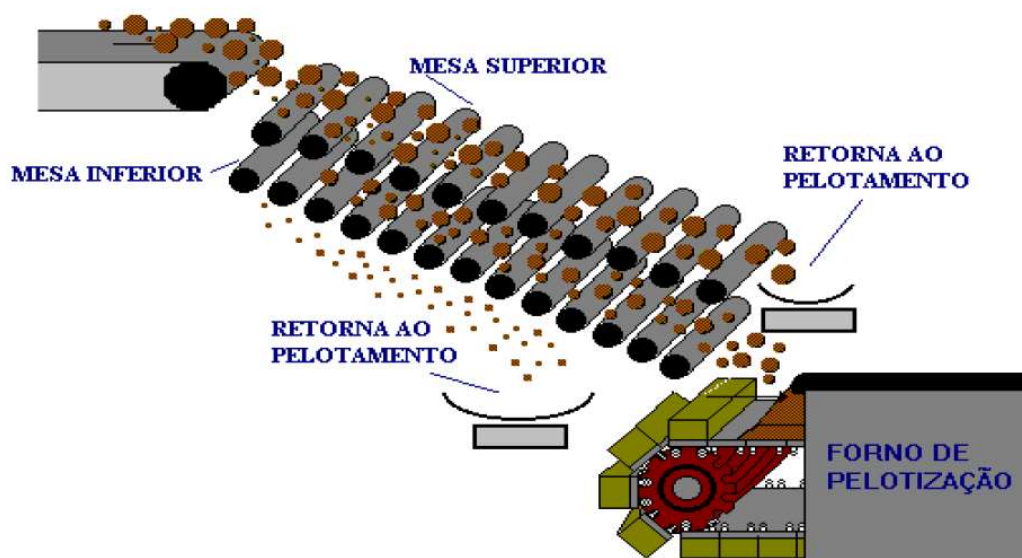
Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2008.

### 3.3.10 Peneiramento

O peneiramento de pelotas “cruas”, tanto na descarga de cada disco ou tambor quanto na entrada do forno, normalmente é feito por peneiras de rolos. O objetivo desta etapa é manter a maior uniformidade possível na alimentação do forno, melhorando, conseqüentemente, o acabamento superficial das pelotas e as condições operacionais de permeabilidade do forno.

O controle da abertura dos *gaps*, ou seja, a distância entre os rolos, é de fundamental importância para que somente entre no forno pelotas dentro da faixa granulométrica ideal para a queima. O ideal é que cada disco ou tambor tenha individualmente o seu sistema de peneiramento de pelotas e que também na entrada do forno, haja outra peneira, de preferência com duplo *deck*, visando ajustar a qualidade granulométrica e também retirar os finos gerados no transporte. Este cuidado é de extrema importância pois, a etapa seguinte, a queima, é diretamente impactada pela perda de permeabilidade do leito, quer pela ampla faixa granulométrica das pelotas, quer pela presença de finos aderidos às pelotas “cruas”.

Na Figura 62 é visualizado uma representação de uma peneira de rolos de duplo deck, e a classificação realizada.



**Figura 62** – Classificação de Pelotas por Peneiras de Rolos.

Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.

A abertura dos *gaps* irá classificar as pelotas que entrarão no forno. As pelotas *oversize* e *undersize* retornam para a etapa anterior, o pelotamento, para um novo processamento.

### 3.3.11 Queima

A etapa de queima é importante para conferir às pelotas alta resistência mecânica e propriedades metalúrgicas adequadas ao uso nos reatores de redução.

No processo de pelotização de minério de ferro, três tipos de fornos são os mais utilizados na queima: Forno Vertical - FV (*shaft furnace*); Grelha Móvel/Forno Rotativo – GM/FR (*grate kiln*); e Grelha Móvel – GM (*travelling grate*).

Não serão abordados nessa dissertação os FV e GM/FR, pois a unidade de Pelotização estudada possui forno do tipo GM.

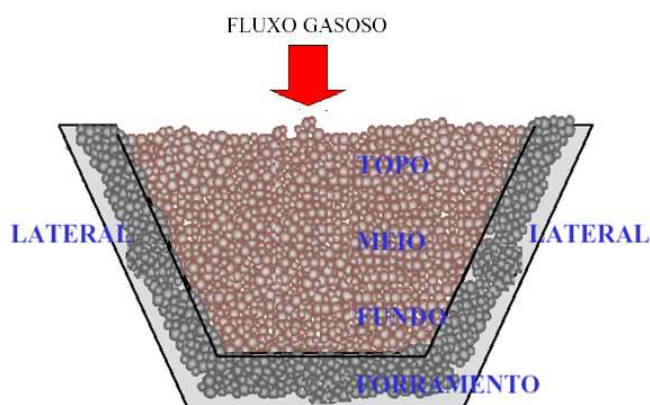
Há várias maneiras de transferir a quantidade de energia necessária da fonte de calor para as pelotas cruas. Independentemente do tipo de processo de queima escolhido, dois métodos principais são usados na transferência de calor:

- Nos fornos FV e GM, o calor é transferido da fonte para as pelotas, em mais de 90% dos casos por convecção pois, os gases quentes passam através do leito de pelotas;
- No forno GM/FR, a maior parte do calor é transferido por radiação.

O princípio de funcionamento dos fornos GM consiste numa camada de pelotas cruas, movendo numa esteira sem fim, através de várias zonas ou seções.

Visando permitir que a parte inferior da camada de pelotas cruas possa alcançar a temperatura mais elevada possível e proteger as barras de grelha, uma pequena camada de pelotas queimadas é colocada entre a camada de pelotas cruas e as barras de grelha. Também para proteger a lateral dos carros de grelha e eliminar o efeito de parede, uma camada de pelotas queimadas é colocada ao longo da lateral dos carros de grelha.

Na Figura 63 tem-se um corte transversal do leito de pelotas num forno GM.

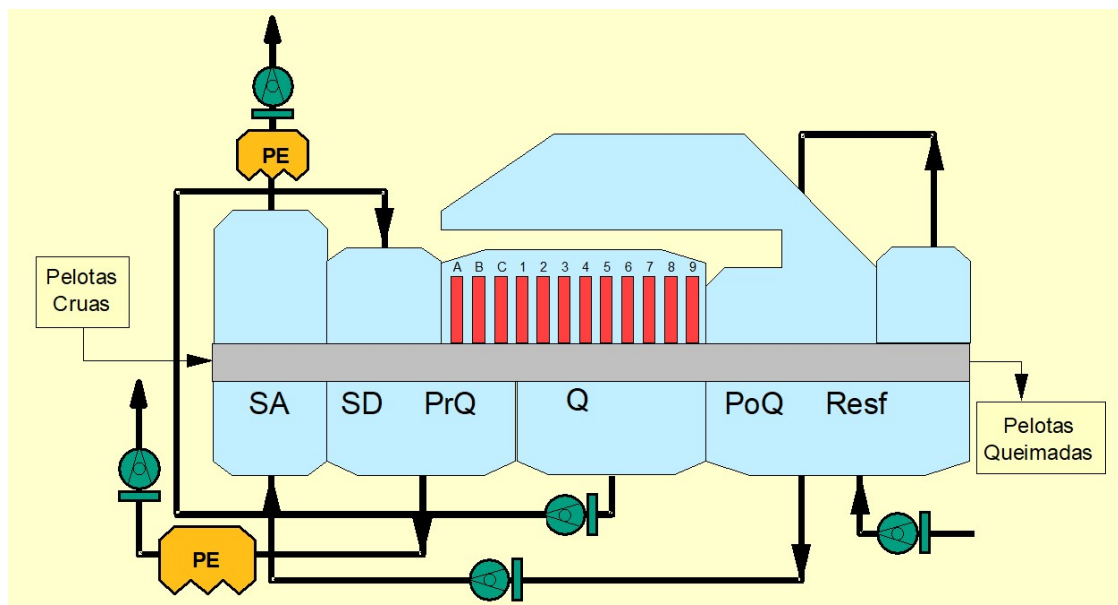


**Figura 63** – Forno de Grelha Móvel – GM, corte transversal do leito de pelotas.

Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.

Os fornos GM são divididos em zonas: secagem ascendente (SA), secagem descendente (SD), pré-queima (PrQ), queima (Q), pós-queima (PoQ) e resfriamento (Resf). Nestes equipamentos, as pelotas passam entre as diversas zonas sob a grelha móvel. Na Figura 64 é apresentado um esquemático de um forno GM e as suas divisões em zonas.

Em todas as usinas de pelotização da Vale instaladas no Brasil, a saber, oito unidades no ES, duas em MG e uma no MA, utilizam este modelo.



**Figura 64** – Esquemático de um forno de Grelha Móvel e suas divisões em zonas.

Fonte: Vale, Introdução a Pelotização de Minério de Ferro, Treinamento Interno, 2010

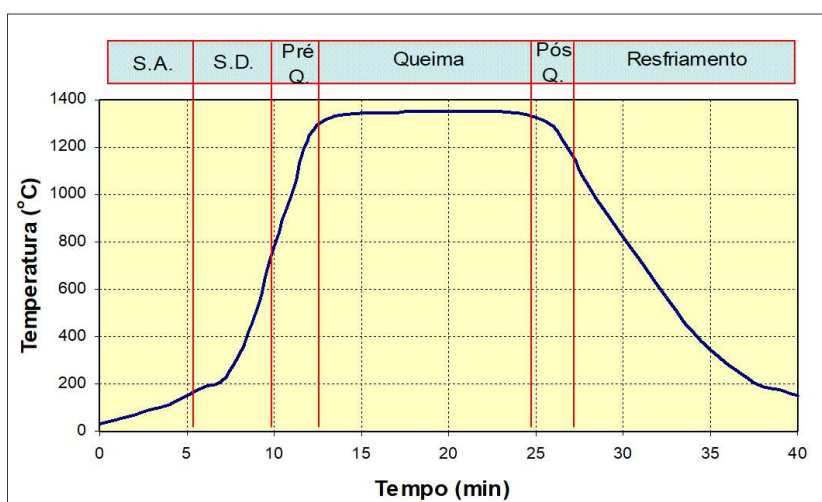
As principais características das zonas do forno GM são:

- **Secagem Ascendente – AS:** As pelotas cruas iniciam o processo de perda de umidade. O objetivo desta etapa é meramente reduzir a recondensação e a desintegração das pelotas cruas nas camadas inferiores do leito devido ao excesso de água. Esta secagem é realizada pelo ar seco vindo do resfriamento secundário. O vapor d'água retirado nas camadas inferiores do leito condensa nas camadas superiores. Isto faz com que as forças de capilaridade deixem de atuar, reduzindo a resistência física das pelotas. O resultado é um aumento no diferencial de pressão do leito de pelotas.
- **Secagem Descendente – SD:** É a continuação da etapa de secagem ascendente. A inversão do fluxo de gases nesta etapa visa, novamente secar por completo a camada superior do leito, pois a umidade na camada inferior foi retirada durante a secagem ascendente. Normalmente ocorre de forma rápida: a água primeiro evapora da superfície da pelota e posteriormente o vapor d'água seco é retirado do interior para fora da pelota, podendo causar sua quebra ou desintegração, pois a pelota ainda está com resistência física baixa.

- Pré-queima - PrQ e Queima – Q: Na pré-queima, a temperatura do gás é progressivamente aumentada até 1100 °C e a magnetita começa a oxidar. Na zona de queima a temperatura do gás chega a 1300 °C. A camada inferior da grelha deve alcançar a temperatura mais elevada possível, visando obter uniformidade na qualidade final do produto. É a etapa mais crítica do processo. A temperatura de pico deve ser mantida por pouco tempo, principalmente quando se produz pelota básica, pois há risco de formação de “cachos” ou fusão acentuada da escória interna da pelota devido ao baixo ponto de fusão dos compostos de CaO. Nessas etapas ocorrem a consolidação das reações entre ferro e escória.
- Pós-Queima: Ocorre a homogeneização do calor.
- Resfriamento – Resf: Nesta etapa o ar frio é injetado através do leito de pelotas. Os carros de grelha e a camada inferior de pelotas são resfriados primeiro, significando que, o tempo de permanência na temperatura de “pico” é reduzido à medida que as pelotas estão posicionadas nas camadas inferiores do leito. Entretanto, para manter um balanço térmico econômico de calor é essencial que o calor retirado da pelota queimada retorne ao processo.

Após o resfriamento, a temperatura final das pelotas deve ser tal que elas possam ser transportadas em correias transportadoras sem adição de água.

O ciclo térmico típico das pelotas nas etapas descritas anteriormente, são apresentadas na Figura 65.



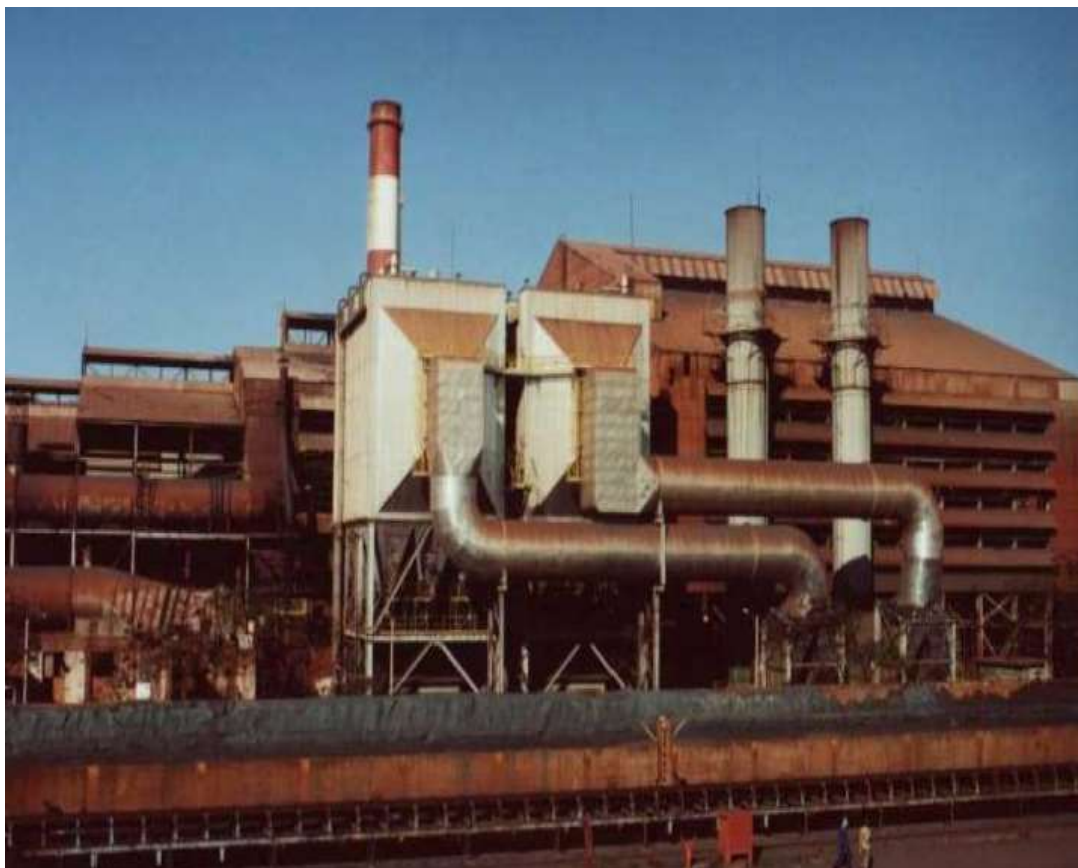
**Figura 65** – Ciclo térmico típico das pelotas em um forno de Grelha Móvel.

Fonte: Vale, Introdução a Pelotização de Minério de Ferro, Treinamento Interno, 2010

As pelotas cruas ou verdes devem ter o teor de umidade necessária a fornecer a resistência física suficiente ao transporte até o forno. Umidade elevada causa o aumento da deformação (plasticidade) e caso ela seja muito baixa, ocorre uma desintegração excessiva. Em ambos os casos haverá uma perda de permeabilidade do leito de pelotas com impacto negativo sobre o processo de queima.

Nesse processo térmico são utilizados ventiladores, sendo a maioria controlados por inversores de frequência.

Os PE, Precipitadores Eletrostáticos, são equipamentos ambientais com alto índice de retenção de particulados. Utiliza a formação de campos elétricos nos eletrodos, suficientemente potentes para ionizar o material particulado suspenso no fluxo gasoso. O material ionizado adere às placas coletoras, sendo descarregado para as tremonhas mediante sistemas de batimentos laterais ou superiores que transmitem a vibração necessária para efetuar a limpeza das placas coletoras. Um exemplo de precipitadores eletrostáticos são apresentados na região central da Figura 66.



**Figura 66** – Exemplo de Precipitador Eletrostático usado no controle ambiental.

Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.



### **3.3.12 Peneiramento de Pelotas Queimadas**

O peneiramento de pelotas queimadas logo após a descarga do forno é importante na retirada dos finos gerados durante a queima. A definição do material a ser usado nas malhas das peneiras, assim como o seu estado de conservação serão responsáveis pelo rendimento operacional da peneira. Outra importância fundamental das peneiras é a geração das pelotas a serem enviadas para o silo de camada de forramento, já citadas no item da etapa da queima. Este silo não poderá receber finos, pois eles irão diretamente para o forno causando perda de permeabilidade do leito.

### **3.3.13 Empilhamento de Pelotas Queimadas**

O empilhamento de pelotas queimadas é uma técnica especial de empilhamento para evitar segregação de tamanhos de pelotas disponíveis para embarque.

No empilhamento das pelotas queimadas ocorre uma segregação natural onde as pelotas grandes e mais pesadas, tendem a rolar para a parte inferior da pilha e os finos ficam depositados na parte superior da pilha.

Este detalhe é de fundamental importância, principalmente durante a recuperação para embarque ou mesmo transferência de pátio. O operador da recuperadora, equipamento que transporta as pelotas do pátio para correias transportadoras, se não atentar, pode embarcar uma porcentagem de finos, fornecendo produtos com especificação diferente da contratada.

Outro aspecto é quando se recupera muito as pelotas grandes e mais pesadas localizadas na parte inferior da pilha, ficando para trás os finos.

Em ambos os casos, há problemas no controle de qualidade do produto.

Nas Figuras 67 e 68 são apresentadas o produto final da Pelotização: pelotas dispostas no pátio prontas para serem enviadas para os clientes e detalhe das pelotas, respectivamente.



**Figura 67** – Pelotas estocadas no pátio aguardando o envio para o cliente.

Fonte: Programa de Especialização Profissional, Fundação Gorceix - Escola de Minas, UFOP. 2006.



**Figura 68** – Pelotas de Minério de Ferro: Produto Final da Pelotização.

Fonte: Vale, Introdução a Pelotização de Minério de Ferro, Treinamento Interno, 2010

## **Apêndice A: Produção Científica**

Durante a realização deste trabalho, os seguintes artigos foram submetidos e aceitos:

- A) FERRO, F. H.; FARDIN, J. F.; SOUZA, G. C. D. Aplicação da MRL na Otimização do Controle de Uma HPGR. In: 13° IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, INDUSCON, 2018, São Paulo.
  
- B) FERRO, F. H.; FARDIN, J. F.; SOUZA, G. C. D.; OLIVEIRA, C. R. G.; VIANNA, I. Q. Utilização de Modelagem em Regressão Linear para Solução de Problema em Prensa de Rolos de Alta Pressão na Pelotização. In: 6° Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios, evento integrante da ABM WEEK 2018, São Paulo.
  
- C) FERRO, F. H.; OLIVEIRA, C. R. G. Identificação de Causa e Soluções para Problema nos Acionamentos de Configuração Mestre e Escravo de Prensa de Rolos de Alta Pressão – HPGR. In: 33° CBMGA – Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos, 2018, Belo Horizonte.