UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

"A prensa de rolos como alternativa para os circuitos de cominuição nas atividades de mineração e a viabilidade de sua aplicação"

Autor: Frederico Bomtempo Gomes
Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres
Fevereiro /2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Frederico Bomtempo Gomes

"A prensa de rolos como alternativa para os circuitos de cominuição nas atividades de mineração e a viabilidade de sua aplicação"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2010

Aos meus pais,
pelas oportunidades e pela educação.
Às pessoas que me cercam
com confiança e positividade.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos aqueles que, diretamente ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular:

Ao professor da UFMG, Antônio Eduardo Clark Peres, não somente pela orientação, mas por acreditar e me fazer acreditar que um Engenheiro Mecânico pode agregar conhecimentos da área de Minas e Metalurgia.

Ao meu pai, herói e companheiro de profissão, que com poucas palavras, mas com olhar expressivo me incentiva na busca incessante pelo conhecimento.

À minha mãe pela força incondicional, que me presenteou com um carinho especial durante a minha fase acadêmica.

Ao meu amor Bruna, pelo apoio moral e pelo exaustivo apoio na revisão ortográfica do trabalho.

Ao Doutor Éder de Silvio pelos comentários diretos e conclusivos que engrandeceram este trabalho.

Ao Joaquim Donda pelas contribuições em forma de comentários e pela prontidão em ajudar.

A toda a diretoria da ECM, em especial à Maria de Lourdes (Dedé) pelo auxílio na escolha do tema e acompanhamento do trabalho.

A todos os companheiros de trabalho que acreditam no meu desenvolvimento e me levam a superar limites.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS 5

LISTA DE TABELAS 7

RESUMO.....9

ABSTRACT.....11

1. INTRODUÇÃO 12

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO 14

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
   3.1.A cominuição e a fragmentação 15
   3.2. A prensa de rolos de alta pressão 18
   3.3. Análise de estudos técnico-econômicos 51
   3.4. Consolidação da tecnologia 73

4. METODOLOGIA 76
   4.1. Casos a serem estudados.....77
   4.2. Análise dos resultados dos testes 78
   4.3. Itens referentes à caracterização do minério.....82
   4.4. Análise econômica dos empreendimentos.....88
   4.5. Diversos outros itens a serem avaliados 90

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 94
   5.1. Itens referente à caracterização do minério 94
   5.2. Análise econômica dos empreendimentos.....95
   5.3. Itens diversos a serem avaliados 96

6. CONCLUSÕES 98

7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS 99

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 100

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 101

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Energia envolvida nos processos de fragmentação. (Fonte: Valadão, 2007)

Figura 3.2 – Partícula mineral após processo de fragmentação por impacto. (Fonte: Valadão, 2007)

Figura 3.3 – Partícula mineral após processo de fragmentação por compressão. (Fonte: Valadão, 2007)

Figura 3.4 – Partícula mineral após processo de fragmentação por cisalhamento. (Fonte: Valadão, 2007)

Figura 3.5 – Funcionamento da prensa de rolos de alta pressão. (Fonte: Pyke et al, 2006)

Figura 3.6 – Tipos de rolos - a) inteiriços, b) anel, c) segmentados. (Fonte: Broeckmann e Gardula, 2005)

Figura 3.7 – Montagem eixo-rolo. (Fonte: Reis, 2007)

Figura 3.8 – *Studs* utilizados nos rolos da prensa de Cerro Verde. (Fonte: Reis, 2007)

Figura 3.9 – Desgaste do revestimento nas diferentes regiões do rolo. (Fonte: Broeckmann e Gardula, 2005)

Figura 3.10 – Tamanho máximo da partícula de minério na alimentação da prensa versus o diâmetro dos rolos. (Fonte: Klymowsky et al, 2006)

Figura 3.11 – Características construtivas do prédio da prensa de rolos. (Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

Figura 3.12 – Posicionamento ideal do extrator de sucatas. (Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

Figura 3.13 – Sistema de b*y-pass* do material na alimentação da prensa. (Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

Figura 3.14 – Componentes a serem desmontados para a retirada dos rolos. (Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

Figura 3.15 – Sistema opcional para retirada dos rolos. (Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

Figura 3.16 – Retirada dos rolos. (Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

Figura 3.17 – Circuito SABC. (Delboni, 2006)

Figura 3.18 – Circuito Convencional – SABC. (Parker et al, 2001)

Figura 3.19 – Diagrama de blocos do circuito de cominuição Pré-moagem / Circuito SABC. (Parker et al, 2001)

Figura 3.20 – Diagrama de blocos do circuito de cominuição Prensa de Rolos / Moinho de Bolas. (Parker et al, 2001)

Figura 3.21 – Diagrama de blocos com as operações unitárias de processo selecionado. (Parker et al, 2001)

Figura 3.22 – Número de prensas de rolos implantadas na indústria mineral correspondente ao ano de implantação. (Klymowsky et al, 2008)

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.I: Quantidade de bolas a preencher o “Moinho de Bond” (Klymowsky, 2005)

Tabela 3.II: Sumário do custo de implantação do circuito de cominuição (Vanderbeek et al, 2006)

Tabela 3.III: Comparação do custo operacional do circuito SABC e do circuito composto pela prensa de rolos (Vanderbeek et al, 2006)

Tabela 3.IV: Custos de operação e custo de implantação dos circuitos de cominuição (Parker et al, 2001)

Tabela 3.V: Equipamentos que compõem cada alternativa (Silvio, 2007)

Tabela 3.VI: Potência consumida (Silvio, 2007)

Tabela 3.VII: Parâmetros utilizados para dimensionar os moinhos (Silvio, 2007)

Tabela 3.VIII: Necessidade de mão de obra (Silvio, 2007)

Tabela 3.IX: Consumíveis da moagem (Silvio, 2007)

Tabela 3.X: Investimento de implantação (Silvio, 2007)

Tabela 3.XI: Custo operacional (Silvio, 2007)

Tabela 3.XII: Custo operacional – 20 anos (Silvio, 2007)

Tabela 4.I: Dureza do Minério – Plano de Lavra. (Morrell, 2006)

Tabela 5.I: Resumo dos itens referentes à caracterização do minério (Gomes, 2010)

Tabela 5.II: Resumo da análise econômica dos empreendimentos (Gomes, 2010)

Tabela 5.III: Resumo dos itens diversos a serem avaliados (Gomes, 2010)

RESUMO

As etapas de fragmentação de uma planta de mineração exercem papel fundamental na viabilização do aproveitamento de jazidas minerais de baixos teores. A busca por economias advindas do uso de novas tecnologias é, atualmente, muito bem vista pela indústria mineral.

A prensa de rolos de alta pressão, em inglês *High Pressure Grinding Rolls* (HPGR), é um equipamento relativamente novo e eficiente nos quesitos energéticos. Existem diversas configurações de circuitos de cominuição que consideram a prensa de rolos. No Brasil, as aplicações que mais se destacam são a substituição da moagem AG/SAG, a substituição de etapas de britagem/pré-moagem e a geração de superfície em etapa que antecede a pelotização.

Existe um volume considerável de material disponível sobre a prensa de rolos, no entanto, parte se encontra desatualizado e a grande maioria não se encontra redigido na Língua Portuguesa. Este trabalho filtrou e aglutinou o máximo de informações sobre HPGR, buscando diagnosticar suas vantagens e desvantagens.

O presente trabalho tem como objetivo comparar dados extraídos de relatórios de testes de fabricantes e de estudos realizados pela empresa de engenharia e consultoria ECM S.A – Projetos Industriais, referentes às minas de Salobo, Cerro Verde e Minas Rio e, a partir desses dados, detetar similaridades entre as plantas e elaborar um quadro comparativo para permitir que futuros estudos de implantação da prensa de rolos avancem ou sejam descartados, ainda em fase inicial de projeto.

O que se pode concluir dos resultados é que a aplicação da prensa de rolos pode se justificar por fatores técnicos, econômicos ou na maioria dos casos pelo somatório de ambos. A maior certeza que se tem atualmente é que a prensa de rolos tende a se tornar viável em circuitos simples, por exemplo, onde a moagem de bolas é alimentada diretamente pelo produto da prensa. Esse tipo de circuito se beneficia da quantidade de finos gerados pela prensa e culmina na redução do número e tamanho de moinhos de bolas a serem utilizados.

ABSTRACT

The steps of comminution associated with a mining plant play a crucial role in enabling the processing of low grade mineral deposits. The search for savings through the use of new technologies is, nowadays, very well accepted part of the mining industry.

The high pressure grinding rolls (HPGR) is a relatively new type of equipment and is very efficient in terms of energy savings. There are several configurations for comminution circuits that employ the use of roller presses. In Brazil, notable applications are for the replacement of AG / SAG grinding, for the replacement of steps in crushing / grinding and pre-generation of surface or as the step prior to iron ore pelletizing.

There is a considerable amount of material available on the subject of roller presses, however, most of it is outdated and is not written in the Portuguese language. The present work filtered and coalesced as much information about HPGR`s, diagnosing its advantages and disadvantages.

This study aims to compare data from test reports from manufacturers and studies conducted by the engineering and consulting company ECM SA - Industrial Projects, referring to the mines of Salobo, Cerro Verde and Minas Rio, and from this data, create a comparative table to aid future studies relative to the implementation of the roller press to be advanced or be discarded at an early stage of the design process.

What is clear from the results is that the application of a roller press can be justified due to technical factors, economic factors or in most cases, both of these factors. The most certainty we now have is that the roller press tends to be more easily justified in simple circuits, for example, where the ball grinding is fed directly by the product of the roller press. This type of circuit benefits from the amount of fines generated by the press and it culminates in the reduction in the number and size of ball mills to be used.

1. INTRODUÇÃO

A cominuição faz-se necessária nas operações de tratamento de minérios para duas finalidades principais:

i. liberar as partículas dos minerais úteis dos minerais de ganga e permitir a sua separação, através dos processos de concentração, em: concentrados, rejeitos e produtos intermediários;

ii. reduzir o tamanho da partícula mineral, seja para o transporte do minério a granel, seja para permitir a utilização do minério em alguma aplicação específica, ou, simplesmente para atender os requisitos de tamanho solicitado pelo cliente.

A prensa de rolos de alta pressão é um equipamento utilizado para realizar a cominuição. Ela também é conhecida em inglês como *Roller Press* ou *High Pressure Grinding Rolls* – HPGR. O princípio de funcionamento do equipamento nasceu da realização da idéia de que se pressão suficiente fosse aplicada a um leito de partículas, vantagens poderiam ser atingidas em termos de eficiência operacional e energética. A lenta aplicação de carga sobre as partículas causa colapso estrutural dos grãos, de modo que a energia perdida em calor e ruído é minimizada. As prensas de rolos de alta pressão são hoje, do ponto de vista energético, os mais eficientes equipamentos de cominuição.

Historicamente, rolos sempre chamaram a atenção dos engenheiros e são utilizados para a cominuição de materiais desde os primórdios da humanidade.

A atual tecnologia da prensa de rolos de alta pressão foi introduzida inicialmente na briquetagem de carvão, no começo do século XX. Nos meados da década de 80 ela passou a ser utilizada nas aplicações de cominuição, quando foi aplicada na indústria de cimento, tratando materiais relativamente fáceis de serem cominuídos. Em 1987 começou a ser utilizada na moagem de kimberlito, rocha matriz do diamante. 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.

Existem diversas aplicações para a prensa de rolos nas atividades de mineração. No Brasil, as que mais se destacam são:

i. substituição de etapas de britagem/pré-moagem: nesta aplicação, a utilização da prensa produz uma alimentação da moagem fina com fração de material alta já na faixa de produto, causada pela cominuição interparticular de alta pressão. A grande quantidade de finos gerados pela prensa de rolos sustenta um potencial de aumentar a taxa de alimentação na moagem de bolas entre 30 e 50%;

ii. substituição da moagem AG/SAG: nesta aplicação a utilização da prensa de rolos se dá em detrimento à moagem SAG, objetiva o aumento de capacidade, redução do consumo de energia, exclusão da etapa de reciclo de *pebbles*, redução de gastos com corpos moedores, menor tempo para implantação, maior simplicidade de operação e outros;

iii. etapa complementar para gerar superfície, na pelotização: nesta aplicação, a prensa de rolos tem como objetivo aumentar a área superficial das partículas de minério para maximizar a eficiência da mistura, em etapa antecessora à pelotização.

A prensa de rolos é um equipamento relativamente novo na mineração, que precisou evoluir muito nos últimos anos para atingir maiores capacidades de processamento, maior confiabilidade e redução de custos de implantação e operação. Atualmente, a tecnologia utilizada pela prensa de rolos amadureceu a ponto de estar presente nos projetos em desenvolvimento para a indústria mineral e também operando em plantas que processam diferentes tipos de minério.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

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.

O JKMRC (1995) estima que 30 a 50% de toda a energia gasta em uma planta de beneficiamento é consumida na etapa de cominuição, podendo esse valor chegar a 70% para minérios muito competentes.

Segundo Wills (1992), 50% do custo operacional de uma planta é gasto na etapa de cominuição (energia, corpos moedores e revestimento).

Com o somatório dos argumentos expostos, pode-se dizer que em função da relevância das operações de fragmentação em uma planta de mineração, o mercado mineral acabou se abrindo para avaliar novas e promissoras tecnologias que se propõem a buscar atratividade econômica para viabilizar jazidas minerais pouco atraentes.

O objetivo deste trabalho é avaliar um equipamento que se propõe a reduzir custos de implantação e operação, apresentar suas vantagens e desvantagens, apresentar casos onde a implantação obteve êxito e, por fim, construir uma metodologia para auxiliar na continuidade ou no descarte da aplicação deste equipamento em futuros estudos de projeto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A cominuição e a fragmentação

A cominuição, palavra derivada do latim *comminuere*, 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 e Peres, 2003)

Estagiamento do trabalho de fragmentação

A fragmentação de blocos ou maciços rochosos é um processo que é realizado em estágios. O desmonte de rochas, com explosivos, constitui a primeira etapa de fragmentação. Desmontes mecânicos ou hidráulicos também podem ser utilizados em minérios friáveis ou aluminosos.

Aspectos energéticos da fragmentação

A fragmentação deve ser realizada com rigoroso controle por ser uma operação normalmente cara. A fragmentação excessiva deve ser evitada, sendo limitada pelos requerimentos granulométricos do mercado ou para atingir o nível de teor desejado nas especificações. A fragmentação é realizada, via de regra, em circuito fechado com equipamentos de separação por tamanho para a obtenção de um produto com granulometria uniforme e para obtenção da maior capacidade de produção.

As forças envolvidas nos equipamentos de fragmentação, basicamente, são: impacto, compressão e cisalhamento. As diferenças entre os equipamentos estão associadas aos diferentes tipos de mecanismos que levam à aplicação dessas forças sobre as partículas minerais.

A energia aplicada aos três tipos de mecanismos de fragmentação é descrita na figura 3.1.

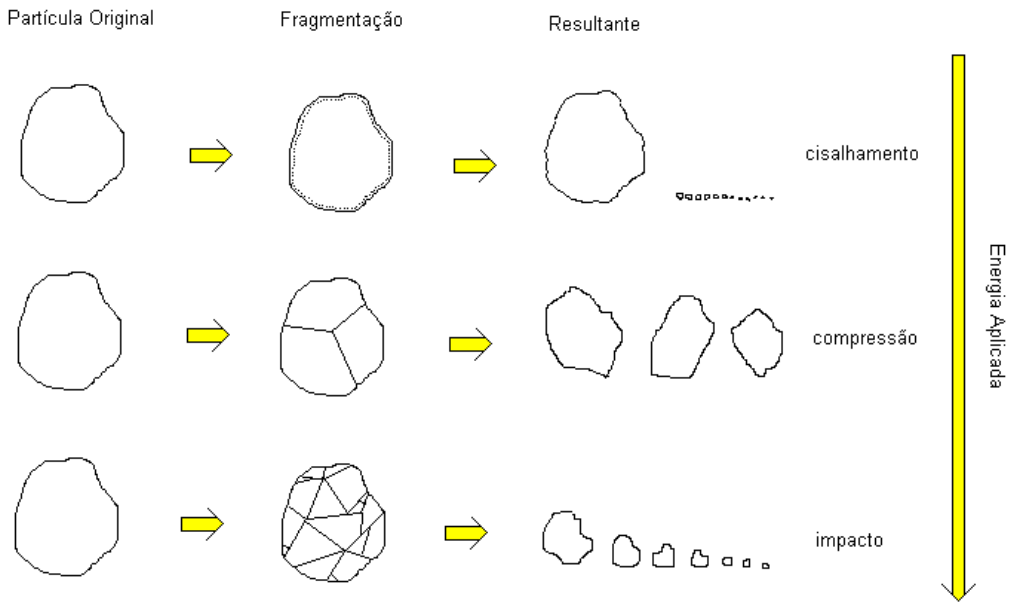

Figura 3.1 – Energia envolvida nos processos de fragmentação. (Fonte: Valadão, 2007)

Impacto: é o mais eficiente em termos de utilização da energia (figura 3.2). Ocorre quando as forças de fragmentação são aplicadas de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência das partículas. Faz uso, em geral, da energia cinética de corpos em movimentos cadentes.

Mecanismos de fragmentação: britadores de impacto e nas áreas de impacto no interior dos moinhos revolventes.

Figura 3.2 – Partícula mineral após processo de fragmentação por impacto. (Fonte: Valadão, 2007)

Compressão: é a mais comum, aplicável a blocos da ordem de metros até partículas micrométricas (figura 3.3). Ocorre quando forças de compressão são aplicadas de maneira lenta e progressiva, permitindo-se que, com o aparecimento da fratura, o esforço seja aliviado. Em geral, as forças de compressão aplicadas são pouco superiores à resistência mecânica dos blocos rochosos ou partículas. Gera um número reduzido de fragmentos homogêneos de tamanho intermediário.

Mecanismos de fragmentação: britadores de mandíbulas, britadores giratórios e cônicos. Nos moinhos revolventes ele está associado à compressão das partículas entre corpos moedores ou à compressão entre as partículas.

Figura 3.3 – Partícula mineral após processo de fragmentação por compressão. (Fonte: Valadão, 2007)

Cisalhamento ou abrasão: leva a um consumo alto de energia e a uma produção alta de superfinos (figura 3.4). As forças aplicadas são insuficientes para provocar fraturas ao longo de toda a partícula. Prevalece uma concentração de esforços na área periférica que leva ao aparecimento de pequenas fraturas. Neste processo acontece o desbaste das partículas e não a sua fragmentação por inteiro. Partículas muito pequenas convivem com partículas de tamanho próximo ao original.

Mecanismos de fragmentação: partículas maiores são aprisionadas entre superfícies dotadas de movimento. Na maioria das vezes, o movimento entre as superfícies é contrário ao das próprias partículas. É observado frequentemente nos produtos de moagem autógena.

Figura 3.4 – Partícula mineral após processo de fragmentação por cisalhamento. (Fonte: Valadão, 2007)

3.2. A prensa de rolos de alta pressão

3.2.1. Características gerais

O princípio de funcionamento da prensa de rolos se dá 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. As pressões aplicadas pelos cilindros hidro-pneumáticos podem extrapolar 250 Mpa, dependendo do tamanho da máquina.

A figura 3.5 ilustra a prensa de rolos: O *GAP* (S) formado entre o rolo móvel (1) e o rolo fixo (2), o diâmetro dos rolos denominado "D" e o comprimento dos rolos "C".

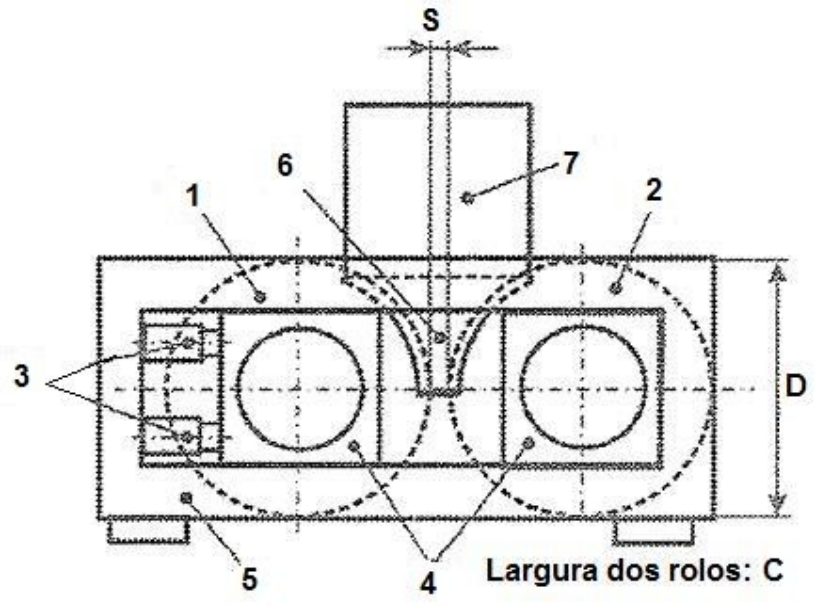

Figura 3.5 – Funcionamento da prensa de rolos de alta pressão. (Fonte: Pyke et al, 2006)

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 01 introduz a força específica da moagem que é definida pela força aplicada a uma determinada área (comprimento x diâmetro dos rolos).

$$P = \frac{F}{C \times D} \qquad \text{Eq. 01}$$

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.

3.2.2. Mecanismos de cominuição envolvidos

As partículas dentro da prensa de rolos podem se comportar de duas maneiras distintas:

i. partículas menores que a abertura entre os rolos (*GAP*): estas se acomodam no leito de material e sofrem cominuição interparticular de alta pressão;

ii. partículas maiores que a abertura entre os rolos (*GAP*): estas sofrem ruptura por compressão em mecanismo de quebra semelhante ao de um britador de rolos.

O princípio de uma prensa e de um britador de rolos é bastante parecido, segundo Klymowsky et al, (2006). A seguir, segue o que distingue a prensa de rolos de alta pressão de um britador de rolos convencional:

i. um sistema hidro-pneumático capaz de aplicar e manter pressões que podem extrapolar 250 Mpa;

ii. uma superfície de revestimento substituível, que pode atingir de 4.000 a 8.000 horas para minérios duros e abrasivos;

iii. um sistema composto por um rolo fixo e um rolo móvel, que se ajusta para manter as condições de estrangulamento de alimentação;

iv. um sistema de acionamento que pode ser equipado com inversor de frequência para absorver os requerimentos de processo a jusante ou variações nas características do minério.

3.2.3. Conceituação dos tipos de rolos e revestimentos

Existem diferentes tipos de rolos para a prensa, conforme figura 3.6. A maioria dos equipamentos utilizados na indústria de cimento possui rolos inteiriços (figura 3.6.a). 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 utilizadas 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 re-soldagem na superfície, permite que o rolo seja remodelado diversas vezes antes de ser substituído.

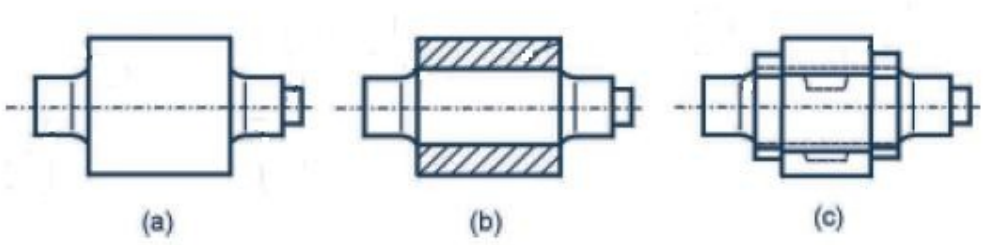

Figura 3.6 – Tipos de rolos - a) inteiriços, b) anel, c) segmentados. (Fonte: Broeckmann e Gardula, 2005)

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 3.6.b). 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.

O eixo é inserido ao rolo com o auxílio de um equipamento de elevação de carga. A montagem acontece através do encolhimento térmico do rolo, causado pelo aquecimento. A figura 3.7 ilustra o processo de aquecimento do rolo e montagem do conjunto.

Figura 3.7 – Montagem eixo-rolo. (Fonte: Reis, 2007)

Uma terceira opção são os rolos segmentados, representados na figura 3.6.c. A concepção deste tipo de rolo é similar ao tipo anel, a diferença é que ao invés da montagem acontecer através de dilatação térmica, a fixação se dá 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 necessáros para esse evento.

Segundo Broeckmann e Gardula (2005), a utilização dos rolos segmentados foi a escolha incorreta na Mina de Cyprus Sieritta, que processa minério de cobre. As articulações entre os segmentos e o eixo desgastaram muito rapidamente e foram necessárias soldagens de reparo que potencializaram o estrago, pois os segmentos se distorceram em relação ao eixo, prejudicando o sistema de travamento.

A experiência prática adquirida na época mostrou que os rolos segmentados são limitados a pressões de operação mais baixas e a minérios mais brandos.

Evolução do revestimento dos rolos

Ao longo dos últimos anos, progressos significativos foram obtidos nos revestimentos aplicados na superfície dos rolos. Este ponto tem deixado a aplicação da prensa de rolos 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 3.8 representa o rolo da prensa de Cerro Verde, ainda na fábrica da Polysius. O rolo é do tipo anel e revestido com *studs.* Neste caso, os *studs* foram pressionados em furos de sustentação presentes na superfície do rolo.

Figura 3.8 – *Studs* utilizados nos rolos da prensa de Cerro Verde. (Fonte: Reis, 2007)

3.2.4. Principais regiões de desgaste dos rolos

O desgaste do revestimento acontece de maneira diferente em duas regiões, conforme figura 3.9. 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.

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.

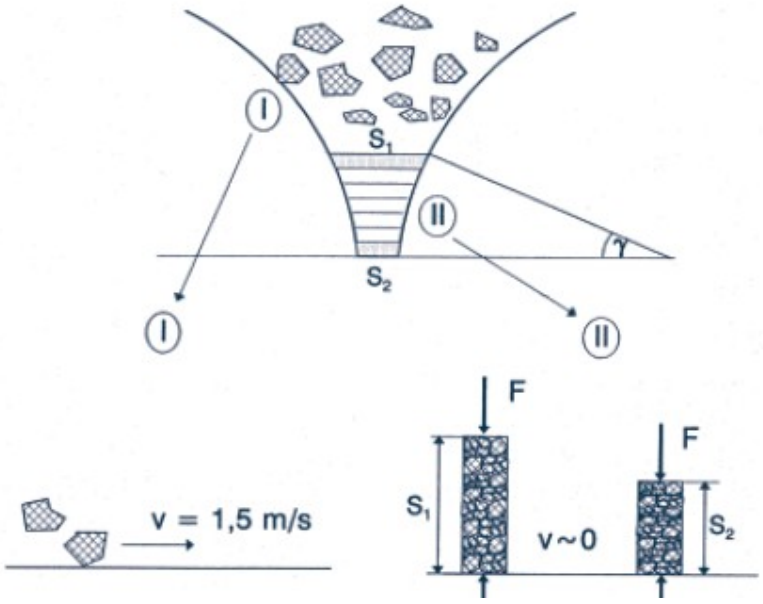

Figura 3.9 – Desgaste do revestimento nas diferentes regiões do rolo.
(Fonte: Broeckmann e Gardula, 2005)

3.2.5. Fatores que afetam a vida útil do revestimento

3.2.5.1. 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, 2002; Maxton et al, 2005). Usualmente, cada fabricante desenvolve a sua própria metodologia para identificar o revestimento mais aplicável aos rolos.

3.2.5.2. 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/mm², em função da natureza frágil dos *studs*. Partículas mais largas geram forças tangenciais contra os *studs*, o que pode acarretar a quebra dos mesmos.

Top size da alimentação versus diâmetro dos rolos

A figura 3.10 relaciona o *top size* da alimentação da prensa com o diâmetro dos rolos. O tamanho máximo aceitável na alimentação aumenta linearmente com o aumento do diâmetro dos rolos. Geralmente, para rolos de até 1,4 m de diâmetro, o *top size* pode ser de até 1½", para rolos de até dois metros de diâmetro o *top size* pode ser de até 2". Para os rolos de 2,4 m de diâmetro, o *top size* pode chegar a 2½" sem maiores danos ao revestimento dos rolos.

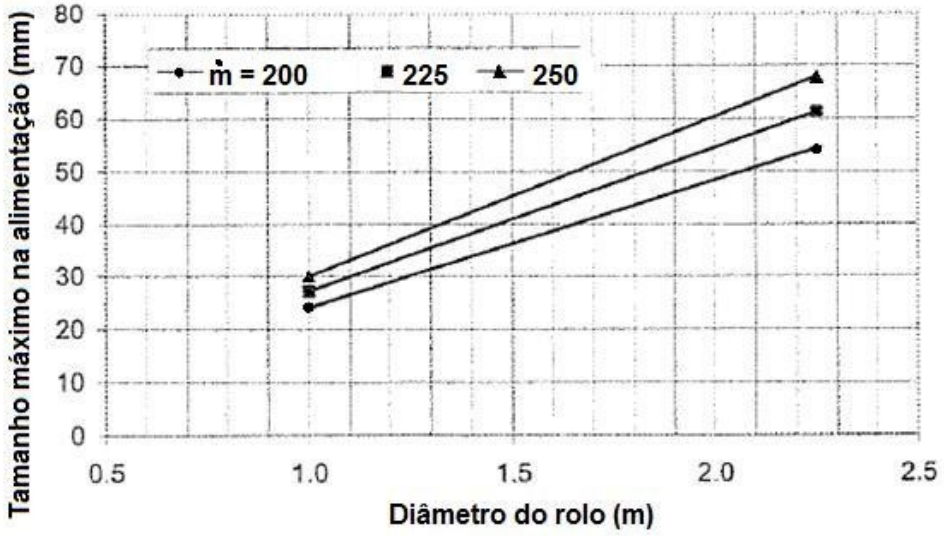

Figura 3.10 –Tamanho máximo da partícula de minério na alimentação da prensa versus o diâmetro dos rolos. (Fonte: Klymowsky et al, 2006)

Embora a literatura "limite" os valores máximos de *top size,* conforme citado, existem aplicações que ultrapassaram os valores referenciais citados, como é o caso da mina de diamantes Argyle, que possui material de até 4" alimentando uma prensa com rolos de 2,8 m de diâmetro. Esse caso é conhecido como uma aplicação de insucesso da prensa de rolos, em função dos transtornos ocorridos com o revestimento dos rolos.

A distância operacional entre os rolos também aumenta de acordo com o aumento do diâmetro do rolo. Obviamente, o tamanho máximo da partícula não é apenas função do diâmetro ou do *GAP* entre os rolos. Segundo Klymowsky et al (2006), a competência do minério também deve ser levada em consideração e o *top size* não deve exceder a distância entre os rolos somente para os minérios duros, com UCS > 180 Mpa.

Para minérios mais brandos, UCS < 80 MPa, o *top size* pode ser de até 1,5 vezes a distância operacional e, finalmente, para os minérios intermediários, o *top size* não deve exceder 1,25 vezes a distância entre os rolos.

Apesar dos valores referenciais citados, a distância operacional entre os rolos não é fixa e durante a operação pode variar até algumas dezenas de milímetros. Esse processo é necessário para que o equipamento possa absorver ligeiras variações mineralógicas existentes na alimentação da planta.

3.2.5.3. Umidade

O revestimento composto por *studs* parte do princípio da proteção autógena, onde o controle correto da umidade do material de alimentação da prensa de rolos 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.

3.2.5.4. 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.

3.2.5.5. Operação da prensa em regime intermitente

O desgaste precoce do revestimento de um rolo com *studs* se potencializa quando a prensa de rolos opera em regime intermitente. A camada autógena de revestimento dos rolos erode quando a prensa para e entra em operação. O principal fato causador desse problema é a não utilização dos inversores de frequência.

3.2.5.6. Forças horizontais causadas pelo regime intermitente da prensa

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 detetado 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.

3.2.5.7. 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.

3.2.6. Vantagens, desvantagens e possíveis benefícios da utilização da prensa de rolos

As vantagens e desvantagens da utilização da prensa de rolos são bem conhecidas. O que atualmente se discute são as incertezas de determinados benefícios da prensa de rolos. As incertezas podem ser tratadas como benefícios em potencial que, no mínimo, merecem ser entendidas de maneira mais detalhada.

3.2.6.1. Vantagens da utilização da prensa de rolos

- Eficiência energética.

A primeira motivação para o uso da prensa de rolos como alternativa de cominuição é a maior eficiência energética quando comparada aos britadores e moinhos convencionais. Na prensa de rolos ocorre lenta aplicação de carga sobre as partículas causando colapso estrutural dos grãos, de modo que a energia perdida em calor e em ruído é minimizada. São hoje, do ponto de vista energético, os mais eficientes equipamentos de cominuição.

A economia energética passa a ser melhor entendida à medida que circuitos de cominuição compostos por prensas de rolos estão sendo colocados em operação ao redor do mundo.

Segundo Kawatra et al (2004), economias energéticas superiores a 20% e economias operacionais de 10 a 20% são atingíveis, dependendo do tipo de minério e aplicação.

- Aumento da capacidade de produção.

Atualmente, cada prensa de rolos atinge capacidade de até 3.000 t/h. O aumento da capacidade de produção é atingível através da aplicação da pressão em níveis elevados e de maneira constante ao leito de material, contrapondo o conceito dos britadores e moinhos que aplicam forças às partículas separadamente.

- Corpos moedores.

O gasto com corpos moedores nos moinhos revolventes é elevado. Um efeito do uso do circuito de cominuição composto pela prensa de rolos é a eliminação dos corpos moedores da moagem SAG, o que de maneira aproximada representa uma economia da mesma ordem de grandeza da economia energética também atingível. Ambos os ganhos podem ser substanciais quando o minério for muito duro e/ou o custo energético local for alto. A vantagem da prensa de rolos é reduzida para minérios mais brandos e quando o custo energético local for baixo.

3.2.6.2. Desvantagens e riscos advindos da utilização da prensa de rolos

- Maior custo de implantação do empreendimento (maioria dos casos).

- Necessidade de controle da poeira gerada pelo equipamento.

- Possibilidade de alteração do regime operacional da planta, em função do desgaste excessivo do revestimento dos rolos da prensa.

O desgaste excessivo do revestimento dos rolos causado por materiais muito duros e abrasivos pode ser um multiplicador dos custos operacionais da planta, acarretando maior frequência do evento de troca de revestimento, podendo inclusive alterar o regime operacional da planta.

- Efeito de bordas.

O efeito de bordas é um problema mecânico com consequências de processo. Ele acontece em função da descompressão das bordas dos rolos, por causa da concentração de material no centro dos mesmos. Nos testes dos fabricantes, quando se compara a granulometria do material de progênie do centro dos rolos e do material coletado em suas extremidades, percebe-se que há significativas variações. O material das extremidades dos rolos é perceptivelmente mais grosseiro.

A descompressão dos rolos é prejudicial ao *top size* do produto da prensa, que, dependendo da sua variação, pode prejudicar a moagem de bolas a jusante, uma vez que existem restrições de granulometria para sua alimentação.

Para tratar esta deficiência os fabricantes vêm propondo cada vez mais a recirculação de bordas, onde se peneira o material oriundo das extremidades dos rolos e o retorna novamente para o circuito. No entanto, esse processo onera o custo de implantação do empreendimento e o custo operacional da planta, pois para fechamento do circuito é necessário um sistema de transportadores de correia, uma etapa adicional de peneiramento e maiores prensas para absorver a recirculação do minério.

3.2.6.3. Possíveis benefícios da prensa de rolos

A criação de micro-fraturas nas partículas de minério é considerada um possível benefício, em função das controvérsias existentes entre os fabricantes e os pesquisadores. Para a maioria dos especialistas o surgimento das trincas estruturais é

uma característica inerente do minério, elas não aparecem na zona de compressão da prensa de rolos e sim nas etapas que a precedem. O que se pode afirmar é que a utilização da prensa tende a maximizar o surgimento das micro-fraturas.

As trincas estruturais proporcionariam vários benefícios. Segundo Morley (2006-b), além dos benefícios atingíveis na moagem, as micro-fraturas podem ser uma excelente ferramenta metalúrgica, proporcionando melhor recuperação na flotação e na lixiviação, e melhorias no espessamento e filtragem.

3.2.7. Projeto do equipamento

Relação comprimento-diâmetro

Tipicamente, o diâmetro de prensas de rolos varia entre 0,5 m e 2,8 m e a largura dos rolos entre 0,2 m e 1,8 m. Um dos mais discutidos aspectos da prensa de rolos é a equação 02, que trata da relação comprimento-diâmetro dos rolos.

$$\lambda = \frac{C}{D} \qquad \text{Eq. 02}$$

Quanto maior for o comprimento do rolo em comparação com o diâmetro, maior será o torque necessário para aplicar a força específica no leito de material e, de maneira geral, o torque necessário é proporcional ao peso e ao custo dos redutores. Os fabricantes do equipamento utilizam relações que variam entre 0,7 e 1,0.

Além do encarecimento da estrutura predial causada pelo peso de um grande redutor, outra desvantagem dos rolos com menores relações λ é a maior nitidez do efeito de borda. Quanto maior a relação λ, maior é a distorção da quantidade de material no centro e nas laterais dos rolos. O resultado da cominuição final pode se tornar consideravelmente afetado, pois as menores pressões nas extremidades dos rolos favorecem a discrepância granulmétrica do produto da prensa. Segundo (Feik, 2003), o efeito de borda deve ser uma das principais razões pela maioria das relações λ estarem na ordem de 1,0.

3.2.8. Considerações de arranjo

Preparação da alimentação

O correto conceito de alimentação se faz necessário para minimizar os problemas de segregação do material na alimentação da prensa de rolos, reduzindo o desgaste desigual dos rolos. A característica construtiva do silo de alimentação das prensas deve preconizar o *mass flow,* conforme figura 3.11.

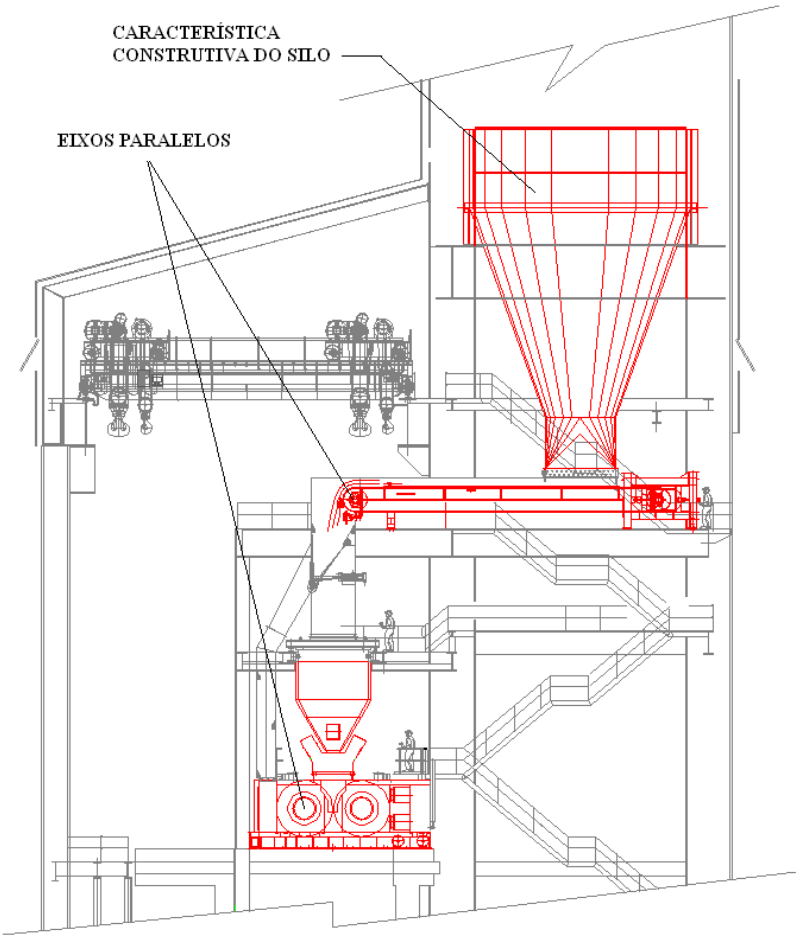

Figura 3.11 – Características construtivas do prédio da prensa de rolos. (Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

O fluxo de alimentação da prensa deve ocorrer simetricamente, para isso é necessário alinhar o eixo do tambor de acionamento do alimentador de correia com o eixo dos rolos da prensa, deixando-os paralelos.

Sistema de alimentação do silo

Quando uma ou duas prensas são requeridas não há maiores empecilhos para o bom funcionamento do sistema de alimentação. Para o segundo caso, um sistema simples composto por um transportador de correia reversível, alimentando silos independentes, é suficiente.

Quando mais de duas prensas são requeridas, o sistema de alimentação dos silos pode ser de diversas maneiras: através de um transportador com *tripper*, através de um transportador móvel e reversível, ou através de um transportador apenas móvel.

Existem vantagens e desvantagens de se alimentar os silos com um transportador móvel/reversível. A principal desvantagem são os problemas de desalinhamento de correia. Esses equipamentos são mais sujeitos a paradas não programadas quando comparados aos transportadores móveis ou com *tripper*, neles, acontecem frequentes problemas de desalinhamento da correia quando a reversão é necessária. No entanto, os problemas de desalinhamento podem ser minimizados com o auxílio dos sistemas de alinhamento de correia, cada vez mais eficientes. A preocupação com o sistema de alimentação das prensas se justifica, pois uma vez parado, todo o processo a jusante também irá parar.

Já as vantagens do transportador móvel/reversível parecem ser suficientes para justificar a sua aplicação: a concepção do prédio é bem mais simples, com economia estrutural e de fundação, uma vez que não é necessário disponibilizar espaço para retração do transportador (móvel ou *tripper*). Outra grande vantagem é a flexibilidade que a reversão da correia possibilita para “by-passar” uma determinada linha de prensagem que esteja indisponível. Desta forma ao parar uma linha para manutenção, as outras podem operar normalmente.

Deteção e remoção de sucatas

A presença de sucatas representa o maior problema para os rolos e, para preservar a sua integridade, é recomendável que se combine as seguintes opções:

i. peneiramento do material em etapa antecessora à alimentação das prensas;

ii. instalação de um extrator de sucatas na descarga do transportador de correia que descarrega no silo de alimentação da prensa de rolos. Conforme ilustrado na figura 3.12, é importante que o extrator de sucatas esteja localizado em cima do tambor de descarga e não ao longo da correia. Esse procedimento permite maior eficiência da extração das sucatas, pois o material estará desagregado.

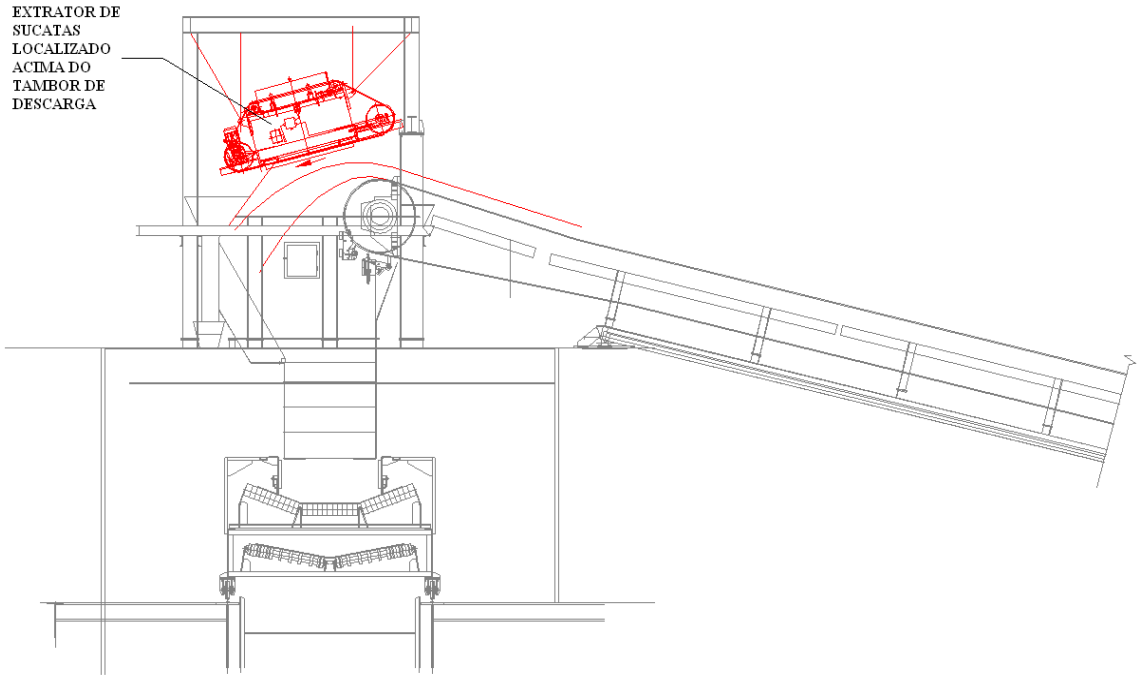

Figura 3.12 – Posicionamento ideal do extrator de sucatas.

(Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

iii. como última proteção antes do material alimentar a prensa, é recomendável a instalação de um detetor de metais que, para evitar interrupções na alimentação, acione automaticamente um desviador de fluxo, "by-passando" o material sem prejudicar a continuidade do processo. É recomendável ainda que o alimentador de correia onde o detector de metais for instalado seja bem largo, assim, a altura da camada de material será reduzida, e a sucata será mais facilmente detetada.

A figura 3.13 ilustra a utilização do detetor de metais e o desviador de fluxo utilizado na alimentação da prensa de rolos.

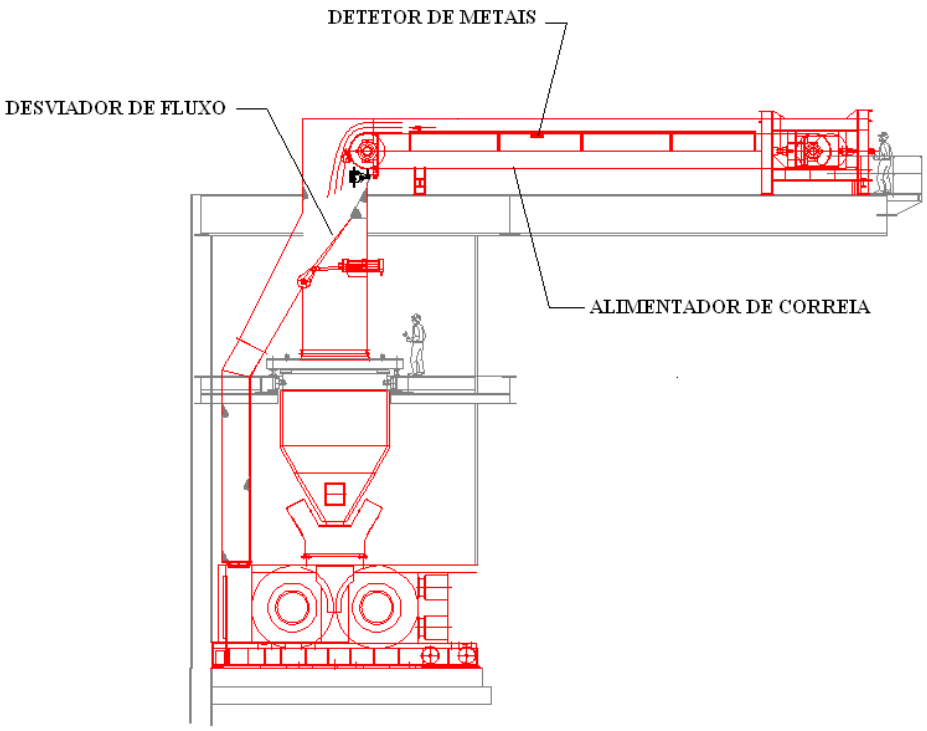

Figura 3.13 – Sistema de *by-pass* do material na alimentação da prensa.
(Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

Controle do processo

Existem dois controles de processo que devem ser respeitados na operação de uma prensa de rolos:

i. no silo de alimentação, o material deve estar em um determinado nível que seja suficiente para gerar pressão do material contra os rolos, de maneira que se forme uma camada de material consistente entre eles, que acarrete em aumento da eficiência da cominuição;

ii. o número de paradas deve ser minimizado, para evitar que a camada autógena que se forma entre os *studs* seja desfeita, preservando assim a vida útil do revestimento.

O número de paradas da prensa pode ser significativamente reduzido através da instalação de inversores de frequência em seus rolos, outra vez, controlados pelo sinal proveniente do medidor de nível do silo de alimentação, assim, obtém-se sintonia entre a alimentação da prensa e o enchimento do silo.

Os dois controles podem operar de maneira independente e/ou simultânea.

Controle do nível

Segundo Morley (2006-a), a escolha do dispositivo de controle de nível adequado para o silo de alimentação da prensa de rolos não é uma tarefa tão simples. A montagem do silo sobre células de carga já estabelece uma boa aproximação do controle de nível, no entanto, outros dispositivos devem ser utilizados.

Os sensores ultrassônicos e do tipo radar não são ideais quando um *by-pass* é utilizado no alimentador de correia responsável pela alimentação da prensa. O motivo é que a recuperação do sinal causado pelo movimento do desviador de fluxo é lenta e pode gerar instabilidade no controle do processo.

Os sensores a laser oferecem uma taxa de recuperação muito mais rápida, mas não são aplicáveis para alimentação seca, com muita poeira presente.

Os sensores radioativos não são afetados pela poeira, não são susceptíveis a interrupções de sinais causadas pelo desviador de fluxo e não requerem nenhum tipo de projeto estrutural diferenciado. O único problema é o envolvimento de materiais radioativos em sua concepção, o que demanda cuidados especiais de manutenção e operação.

Exceto a medição por células de carga, todas as opções descritas anteriormente são sujeitas a problemas de má instalação ou operacionais.

A opção pela instrumentação deve ser um caso avaliado em cada projeto e as combinações entre células de carga e sensores podem ser muito bem aproveitadas.

3.2.9. Manutenção – Procedimento de retirada dos rolos

O sistema de troca de rolos disponibilizado pelos fabricantes de prensas é bastante similar. O objetivo é oferecer maior agilidade e segurança durante o evento.

Tipicamente, o sistema de troca dos rolos pode ser dividido em duas etapas. A primeira é a de desmontagem dos componentes que estão conectados ao rolo e a segunda é a retirada dos rolos desgastados e a instalação dos novos rolos.

Na desmontagem dos rolos, o eixo cardan, responsável pela transmissão de torque entre o motor e o redutor, deve ser retirado. O processo é conduzido com o auxílio de uma talha manual. A retirada do eixo cardan e dos demais componentes faz-se necessária para posterior retirada dos rolos.

Com o espaço liberado pela retirada do eixo cardan, inicia-se o processo de desacoplamento do redutor, que está conectado ao eixo do rolo através de um flange, utilizado para facilitar a sua retirada. Para as prensas de grande porte, o redutor pode

pesar até 20 toneladas, portanto, é recomendável que ele seja retirado com o auxílio de um sistema de remoção, opcionalmente ofertado pelo fabricante, cuja função é sustentar o redutor durante o período de troca do rolo. O sistema de remoção dos redutores vai assegurar que a equipe de manutenção trabalhe com segurança e obtenha maior eficiência na remoção, armazenamento e reinstalação dos redutores durante o processo de desmontagem.

A maior vantagem do sistema descrito é o realinhamento preciso dos redutores durante a reconexão aos eixos. A precisão é atingida através dos cilindros hidráulicos que controlam os suportes do redutor. Cada cilindro possui um manômetro, que grava as cargas que estão atuando sobre os suportes.

Os tubos de lubrificação e a caldeiraria responsável por vedar o silo de alimentação com os rolos também são retirados.

A figura 3.14 ilustra os componentes que devem ser desmontados para a retirada dos rolos.

Figura 3.14 – Componentes a serem desmontados para a retirada dos rolos.

(Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

Após a desmontagem dos componentes citados, é necessário instalar o cilindro hidráulico para retirada dos rolos. Uma vez removidos do quadro principal, os rolos podem ser retirados diretamente pela ponte rolante ou com o auxílio de um sistema de retirada especial, composto por um berço de sustentação de rolos, conforme figura 3.15. Para a segunda situação, devem ser previstos trilhos para direcionar o berço para a região de içamento da ponte rolante. Com esse sistema as prensas de rolos podem ser instaladas em paralelo (lado a lado) e/ou de frente para a outra, assim, apenas uma ponte rolante e um conjunto de trilhos é requerido para atender todas as prensas. A ponte rolante descarrega o rolo em um caminhão que irá conduzi-lo para a oficina de troca de revestimento, que pode ser localizada na planta ou fora dela.

Idealmente, dois rolos já montados devem estar disponíveis nas proximidades para troca imediata.

O sistema de retirada dos rolos por trilhos, com a utilização de um berço para suportar o rolo, conforme representado na figura 3.15, é recomendável por fatores de segurança. As prensas de rolos de grande porte, como as de diâmetro e largura se aproximando ou excedendo dois metros, chegam a pesar de 80 a 100 toneladas. O peso se refere à montagem completa, incluindo rolo, eixo e mancais.

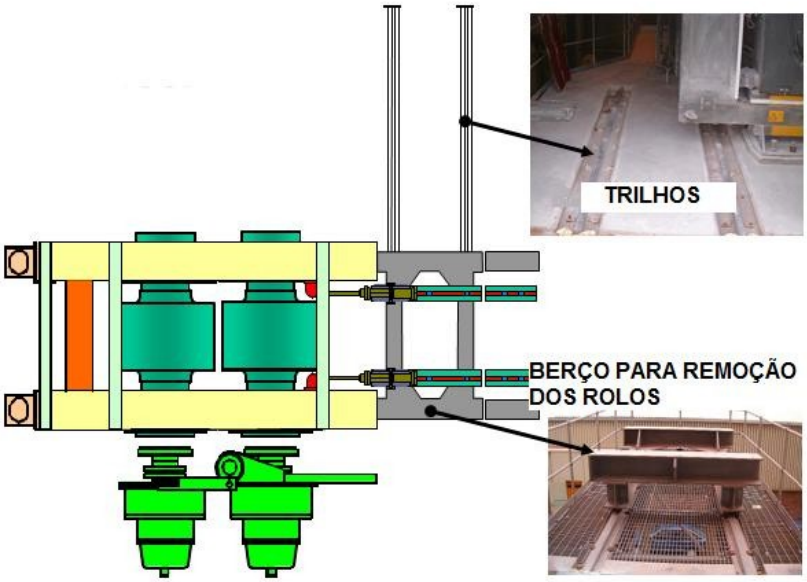

Figura 3.15 – Sistema opcional para retirada dos rolos.
(Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

O primeiro rolo a ser retirado é o fixo. No entanto, ao retirar o primeiro rolo, é necessário que todos os componentes dos dois rolos já estejam desmontados, pois quando o cilindro hidráulico puxa o rolo fixo, o rolo móvel também é deslocado, conforme figura 3.16.

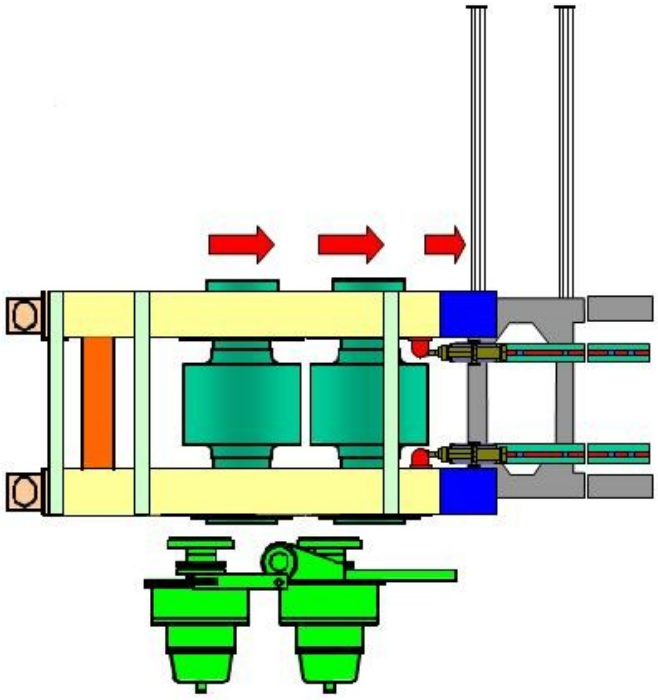

Figura 3.16 – Retirada dos rolos. (Fonte: ECM - Projeto Minas Rio, 2008)

Após a retirada dos rolos desgastados, os novos devem ser instalados através do procedimento reverso ao citado.

O procedimento de troca dos rolos é uma importante atividade de manutenção que é empreendida em média a cada 5.000 horas, para os minérios mais abrasivos. Pela alta frequência deste evento, é fundamental que a troca dos rolos aconteça o mais rápido possível, para não alterar o regime operacional da planta.

Como o tempo para troca dos rolos é relativamente alto, em torno de dois dias, dá-se a importância de estar sempre buscando novas tecnologias para aumentar a vida útil dos rolos através do desenvolvimento constante de revestimentos que se adaptem cada vez melhor a minérios duros e abrasivos.

3.2.10. Parâmetros chave para dimensionamento da prensa de rolos de alta pressão

Para dimensionar uma prensa de rolos é necessário encontrar os requerimentos de alimentação e os requisitos necessários para atingir uma determinada granulometria do produto. Os parâmetros chave são a capacidade específica (equação 03) e a força específica da moagem (equação 04). Esta última deve ser ajustada para produzir o resultado de cominuição desejado.

Capacidade específica (*specific throughput rate*)

$$\dot{m} = \frac{M}{D \times C \times u}\left[\frac{t \times s}{h \times m^3}\right] \qquad \text{Eq. 03}$$

Onde:

$\dot{m}$	[t x s /(m³ x h)] :	capacidade específica
M	[t/h]:	capacidade unitária
D	[m]:	diâmetro dos rolos
C	[m] :	comprimento dos rolos
u	[m/s] :	velocidade tangencial dos rolos

A capacidade específica corresponde à alimentação de uma prensa com rolos de 1 m de diâmetro e 1 m de largura, com a velocidade dos rolos de 1m/s. (Klymowsky et al, 2006)

A capacidade específica é então definida como a capacidade, dada em t/h, dividida pelo diâmetro dos rolos, dado em m, largura dos rolos, dada em m, e a velocidade periférica, dada em m/s. A importância deste parâmetro é que permite a comparação entre prensas de qualquer tamanho, desde que a superfície dos rolos seja semelhante.

A capacidade específica depende principalmente das propriedades físicas do minério (dureza, densidade do material, granulometria, distribuição da alimentação e umidade), da força de moagem específica e do tipo de superfície dos rolos.

Força específica da moagem *(specific press force)*

$$F(sp) = \frac{F}{1000 \times C \times D} \left[\frac{N}{mm^2}\right] \qquad \text{Eq. 04}$$

Onde:

F(sp)	[N/mm²] :	força de moagem específica
F	[kN] :	força de moagem
C	[m] :	comprimento dos rolos
D	[m] :	diâmetro dos rolos

A força específica da moagem é definida como a força hidráulica total exercida nos rolos dividida pela área projetada dos rolos, na unidade de N/mm². Essa fórmula é útil para comparar pressões em diferentes tamanhos de prensas. (Klymowsky et al, 2006)

3.2.11. Metodologia para dimensionamento da prensa de rolos

No dimensionamento de uma prensa, o ideal é que os parâmetros chave sejam fornecidos pelo fabricante. Caso não seja possível, elas devem ser estipuladas pelo calculista, tomando como referência aplicações similares.

Os dados a seguir, referentes ao processo, são necessários para determinar o número de prensas para uma determinada taxa de alimentação e a potência consumida per seus acionamentos.

i. taxa de alimentação nominal – (t/h);

ii. fator de projeto;

iii. taxa de alimentação de projeto – (t/h);

iv. peso específico aparente (base seca) – t/m³;

v. peso específico do *cake* – t/m³.

Cálculo do diâmetro e da largura dos rolos

O diâmetro e a largura dos rolos podem ser inicialmente estimados com o auxílio das considerações a seguir. Posteriormente, eles devem ser ajustados de acordo com as demais variáveis de cálculo:

i. a distância operacional entre os rolos – *GAP*, pode ser grosseiramente aproximada como igual ou ligeiramente maior do que o *top size* de alimentação da prensa. Para obter o cálculo estimativo do *GAP*, pode-se considerar a equação 05;

$$So = \frac{\dot{m} \times \emptyset}{\rho_c \times 3{,}6} \qquad \text{Eq. 05}$$

Onde:

So	[mm]:	abertura operacional entre os rolos
$\dot{m}$	[t x s /(m3 x h)] :	capacidade específica
Ø	[m]:	diâmetro dos rolos
ρ_C		densidade da torta

ii. o diâmetro dos rolos varia entre 0,5 e 2,8 m, e, a largura dos rolos entre 0,2 e 1,8 m. Para as aplicações de mineração esses valores se encontram próximos de 2,0 e 1,7, respectivamente;

iii. a relação entre largura e diâmetro – λ, varia entre 0,7 e 1, para as atividades de mineração.

Cálculo do número de prensas de rolos requeridas

A velocidade periférica dos rolos é calculada a partir do diâmetro dos rolos, conforme equação 06.

$$\cup = \emptyset \times 0{,}9(*) \qquad \text{Eq. 06}$$

Onde:

U	[m/s] :	velocidade tangencial dos rolos
Ø	[m]:	diâmetro dos rolos
(*)		constante utilizada pela Polysius

A capacidade unitária é calculada pela equação 07.

$$M = \dot{m} \times \emptyset \times C \times u \qquad \text{Eq. 07}$$

Onde:

M	[t/h]:	capacidade unitária
$\dot{m}$	[t x s /(m3 x h)] :	capacidade específica
Ø	[m]:	diâmetro dos rolos
C	[m]	comprimento dos rolos
u	[m/s] :	velocidade tangencial dos rolos

De posse da capacidade unitária e da taxa de alimentação de projeto, tem-se o número de unidades requeridas para o circuito, conforme equação 08.

$$N = \frac{CP}{M} \qquad \text{Eq. 08}$$

Onde:

N:		número de unidades requeridas
CP:	[t/h]:	capacidade de projeto
M:	[t/h]:	capacidade unitária

Consumo específico de energia

O consumo específico de energia é calculado conforme equação 09.

$$\text{Consumo específico} = \frac{\text{potência consumida [kW]}}{\text{taxa de alimentação } [\frac{\text{t}}{\text{h}}]} \qquad \text{Eq. 09}$$

O consumo específico de energia, dado em kWh/t, é proporcional à força específica aplicada aos rolos. Tipicamente, o consumo específico para rolos com revestimento com *studs* varia entre 1 e 3 kWh/t. Como em todos os equipamentos de cominuição, para uma dada granulometria de produto, minérios mais competentes absorvem mais energia que minérios mais brandos.

Como regra geral, a relação entre a força específica e o consumo específico varia entre 1,8 : 1 e 3 : 1, podendo decrescer a 1 : 1 para moagem fina.

O consumo específico de energia é notoriamente afetado pela distribuição granulométrica da alimentação da prensa. À medida que a faixa de distribuição é mais ampla, o peso específico aparente aumenta, em função dos espaços vazios entre as partículas de minério, assim, o consumo específico de energia cai, aumentando a eficiência da cominuição interparticular.

Cálculo do acionamento instalado

A potência teórica requerida por prensa, em kW, é dada conforme equação 10.

$$\text{Pt.} = \frac{\text{CP} \times \text{Consumo específico de energia}}{\text{N}} \qquad \text{Eq. 10}$$

Onde:

Pt:	[kW]:	potência teórica
CP:	[t/h]:	capacidade de projeto
N:		número de unidades requeridas

Visto que cada prensa de rolos possui dois acionamentos, sendo um para cada rolo, pode-se assumir que a potência por rolo é dada pela equação 11.

$$\mathrm{Pr.} = \frac{\mathrm{Pt} \times 1{,}15}{2} \qquad \text{Eq. 11}$$

Onde:

Pr:	[kW]:	potência por rolo
Pt:	[kW]:	potência teórica
1,15:		fator de segurança

3.2.12. Testes disponíveis para utilização e dimensionamento da prensa de rolos

ATWAL – Teste de abrasão da prensa de rolos de alta pressão (*abrasion testing high pressure grinding roll*)

Este teste é utilizado para determinar as taxas de desgaste de diferentes minérios na prensa. A ATWAL é alimentada com 100 kg de material. Os rolos são pesados antes e depois do teste. A taxa de desgaste específica é então calculada conforme a taxa de "perda de peso dos rolos" dividida pela quantidade de material tratado. (Polysius, 2008)

O desgaste é apresentado em g/t e representa a taxa de desgaste específica. Os dados obtidos no teste são analisados contra informações do banco de dados da Polysius, assim, surgem as garantias para o revestimento.

REGRO – prensa de rolos de alta pressão semi industrial (*semi industrial high pressure grinding roll*)

A REGRO é equipada com uma superfície de proteção de desgaste autógena, criada como o auxílio dos pinos em sua superfície (*studs*).

Os dados de processo obtidos no teste permitem o dimensionamento dos equipamentos em escala industrial e possibilitam os cálculos dos seguintes parâmetros chave para dimensionar a prensa de rolos:

i. capacidade específica;

ii. força específica da moagem.

Testes de peneiramento do produto da prensa de rolos

O teste de peneiramento é realizado com o produto da prensa em um circuito fechado. Esse teste ajuda a determinar se um meio desaglomerante mais eficiente precisará ser usado para descompactar o produto da prensa.

Testes de moagem em moinho de bolas

O material utilizado nos testes de moagem é o produto da prensa. O objetivo do teste é quantificar a economia de energia na moagem de bolas.

Existem dois testes em moinhos de bolas: o LabMill e o Teste de Bond.

LabMill

A experiência na aplicação de prensas de rolos demonstrou que um de seus grandes benefícios reside na economia de energia nas operações de moagem subsequentes. Para estimativa deste benefício, foi desenvolvido pela Polysius um teste denominado LabMill, utilizado há décadas para determinação da economia de energia na moagem em base comparativa. O teste é conduzido a seco, em um moinho de bolas com 750 mm de diâmetro e 450 mm de comprimento, com 10 kg de material. A alimentação, abaixo de 30 mm, é moída em etapas utilizando diferentes diâmetros de bolas, selecionados de acordo com a granulometria da alimentação de cada estágio. O consumo de energia e distribuição granulométrica do produto são determinados após cada estágio.

A economia de energia é estimada como a diferença entre a energia requerida pela alimentação original e a requerida pelo produto da prensa de rolos. A Polysius atesta que o teste LabMill é capaz de prover estimativa realista da economia de energia na moagem de bolas induzida pela utilização da prensa de rolos.

Teste de Bond (Klymowsky, 2005)

Um moinho com as seguintes características é utilizado no teste de Bond:

diâmetro do moinho :	12” (0.305 m)
velocidade do moinho :	70 rpm
comprimento do moinho :	12” (0.305 m)
tamanho máximo (*top size*) :	3.3 mm

O “Moinho de Bond” é preenchido com a carga de bolas constante na tabela 3.I.

Tabela 3.I: Quantidade de bolas a preencher o “Moinho de Bond” (Klymowsky, 2005)

Tamanho das bolas	Número de bolas	Peso das bolas (g)
1,50"	37	8.595
1,25"	58	8.013
1,00"	9	642
0,75"	45	1.500
0,63"	50	1.376
Total	**199**	**20.126**

Procedimento do teste:

Uma amostra de aproximadamente 4 kg é completamente cominuída até 100% passante em 3.3 mm. Um volume de 700 cm³ dessa amostra, definida como “material fresco de alimentação”, é coletado para o teste de Bond. O “produto final” é o undersize de uma peneira que possui uma determinada tela, por exemplo, 90 μm.

Antes de começar o teste de Bond, o A80 do “material fresco de alimentação” é determinado e a “quantidade teórica de produto final” é calculada (peso dos 700 cm³ da amostra dividido pela constante 3,5).

O moinho contendo os 700 cm³ de amostra é acionado até atingir um determinado número de revoluções, durante um ciclo. Depois, a carga do moinho é peneirada e a quantidade total de “produto final”, gerada no primeiro ciclo, é determinada.

A quantidade de “produto final” da descarga do moinho é substituída por uma quantidade correspondente de “material fresco de alimentação”. Um novo ciclo é iniciado, durante um determinado número de revoluções do moinho.

O procedimento é repetido até que a quantidade de “produto final” seja igual a “quantidade teórica de produto final”.

O valor P80 do "produto final" é determinado pela análise da amostra final do produto dos ciclos.

O índice de Bond é calculado pela equação 12.

$$Wi = \frac{44,5}{Pi^{0,23} \times G^{0,82} \times \left(\frac{10}{P80^{0,5}} - \frac{10}{A80^{0,5}}\right)}$$ Eq. 12

Onde:

Wi	[kWh/t] :	work index de Bond
Pi	[μm] :	tamanho do produto final da peneira (90 μm)
G	[g/r] :	produto final por revolução do moinho
P80	[μm] :	tamanho do produto (80% passante)
A80	[μm] :	tamanho do produto na alimentação (80% passante)

Segundo Klymowsky et al (2006), os testes de Bond indicam uma média de apenas 5 a 10% de redução no work índex de um mineral tratado na prensa de rolos, o que não é toda a redução de energia que pode ser esperada na moagem com a utilização desse equipamento. Resultados sugerem que a redução de energia é muito maior, cerca de 20 a 30%, devido aos finos criados pela prensa. O efeito adicional de finos no produto normalmente não é refletido no teste de Bond, pois ele só mede os finos gerados pela prensa. A fração fina que já está presente no produto é descontada no teste de Bond.

De acordo com Klymowsky et al (2006), o teste que melhor reflete a economia energética na moagem de bolas após a prensa de rolos é o LabMill, um teste que foi desenvolvido há mais de uma década, exclusivamente para essa aplicação.

3.3. Análise de estudos técnico-econômicos

Vários estudos técnicos econômicos envolvendo a prensa de rolos vêm sendo realizados para as mais variadas aplicações.

O conteúdo destes estudos vem sendo divulgado progressivamente no mercado através de seminários técnicos, pelos fabricantes de prensas e pelas empresas de engenharia. A disponibilização desse tipo de material tem ajudado a popularizar a informação, tornando-a acessível a um grande número de entidades.

Este capítulo revela resumidamente o que esteve por trás de quatro estudos de implantação de prensas de rolos.

3.3.1. Salobo - Vale

Salobo é uma mina de cobre, localizada no norte do Brasil. Análises técnicas, de custo de implantação e custos operacionais foram realizadas durante a fase de projeto.

Por se tratar de um minério que possui características peculiares, o que chamou a atenção neste estudo, foi que a definição esteve mais atrelada a fatores técnicos do que a fatores econômicos. Neste caso, o determinante foi:

i. a capacidade do circuito em absorver as variações do minério: O Minério de Salobo apresenta alta variação mineralógica, que traz significativas variações nos teores de cobre e outros minerais. Ambas alternativas estudadas sofrem os aspectos dessas variações, refletindo na capacidade de produção. Devido aos diferentes tipos de mecanismos de quebra envolvidos na moagem SAG e na prensa de rolos, a segunda alternativa foi considerada muito menos sensível às variações do minério; (AK/ECM, 2006)

ii. a capacidade do circuito de manusear os *pebbles* magnéticos: Na alternativa SAG, os *pebbles* magnéticos são parcialmente retidos nos extratores de sucata destinados a remover os pedaços de corpos moedores rejeitados pelo moinho SAG, para proteção dos britadores de reciclo. Esse material deve ser manuseado e recirculado novamente para a rebritagem de *pebbles*, devido à grande quantidade de cobre presente. Segundo os estudos, durante curtos períodos de tempo de operação da mina, pode se atingir um nível de 35% de magnetita no minério, o que torna o fluxo de *pebbles* magnéticos extremamente significativo. Devido à intrínseca associação da magnetita com o cobre, esses *pebbles* teriam alto valor de mercado, o que justificaria a sua reintegração ao circuito. A tecnologia da prensa de rolos possui maior facilidade ao lidar com as variações de magnetita, em função de não haver a etapa de rebritagem de *pebbles*, ou seja, o material posterior à prensa já tem como destino a moagem de bolas. (AK/ECM, 2006)

Estudos econômicos

Os estudos econômicos realizados indicaram retorno financeiro relacionado ao OPEX da planta e não ao CAPEX.

O consumo de energia geral da planta que considerava em sua rota de processo os moinhos AG/SAG, foi estimado acima do consumo do circuito composto pela prensa de rolos. A diferença foi de 3,5 – 5 kWh/t, dependendo da frente de lavra. (Morrell, 2006)

Ainda sobre o custo operacional, Morrell (2006), estimou que os gastos com o revestimento dos rolos também representaria redução do OPEX, quando comparado aos corpos moedores e revestimentos que seriam necessários para os grandes moinhos AG/SAG.

A vida útil do revestimento dos rolos foi estimada entre 6.500 a 8.000 horas, considerando redução de 35 mm no comprimento dos studs, para manter o tamanho mínimo e evitar perda na eficiência da cominuição, tais como o abaulamento dos rolos e a não formação da camada de revestimento autógena, causada pela aglomeração do material entre os *studs*.

Conclusão

No caso do projeto Salobo, os fatores determinantes para implantação do circuito composto pela prensa de rolos ultrapassaram os estudos financeiros que visam benefícios operacionais e foram ao encontro dos problemas que poderiam ser gerados, com o tratamento de um minério com características atípicas, que contém grande quantidade de magnetita e enorme variação mineralógica. Houve, portanto, consenso geral entre as entidades envolvidas de que o minério de Salobo iria requerer uma operação bastante complexa, onde a prensa se aplicaria com melhor flexibilidade.

3.3.2. Cerro Verde – Phelps Dodge

Cerro Verde é uma mina de cobre localizada no Peru. Os itens relevantes na tomada final de decisão, onde se optou pela utilização do circuito composto pela prensa de rolos, foram:

i. foco no ciclo da planta (mais de 30 anos) e não no custo de implantação do empreendimento, ou seja, diluição do investimento inicial ao longo dos anos;

ii. minimização de risco para o desempenho operacional da planta e cronograma de projeto;

iii. reavaliação da tecnologia padrão, através da moagem SAG, muito utilizada nos últimos 15 anos.

Seleção do circuito de cominuição

A avaliação dos circuitos SABC e prensa de rolos levou em consideração análise de fluxo de caixa, CAPEX, OPEX e os riscos relativos a cada opção (operação, manutenção, flexibilidade, prazo e segurança).

O circuito SABC significa circuito composto por moinho SAG, britador de *pebbles* e moinho de bolas, conforme figura 3.17.

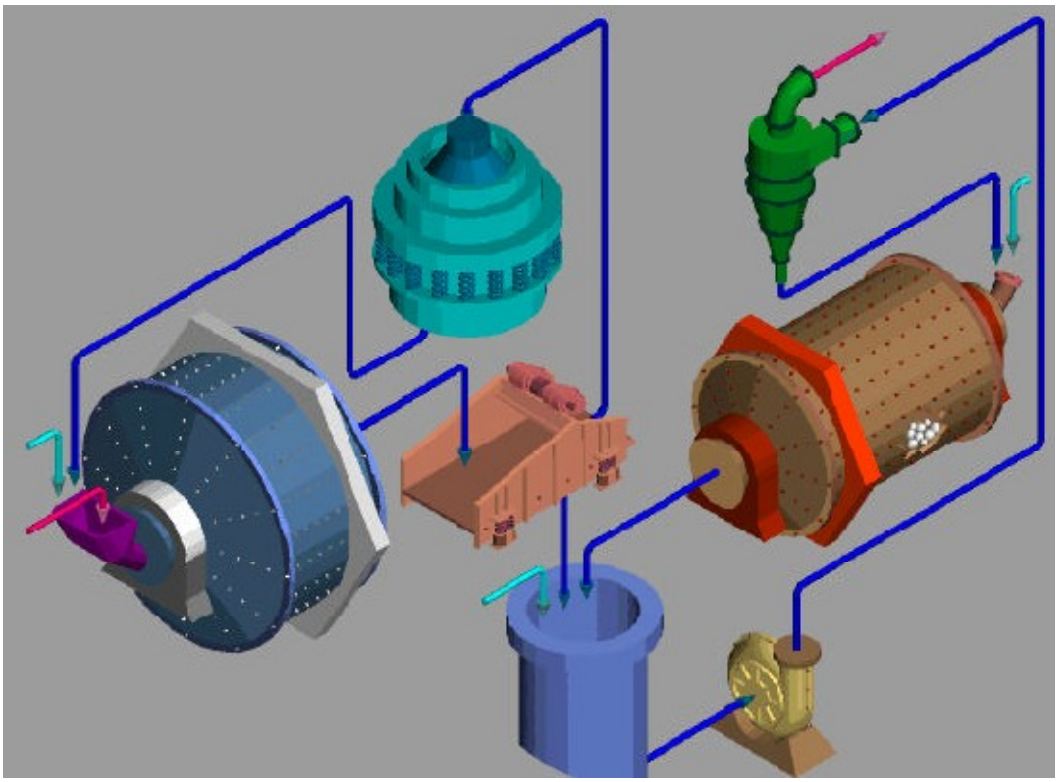

Figura 3.17 – Circuito SABC. (Delboni, 2006)

Comparação do custo de investimento

Os custos de investimento para as duas opções estão tabulados na tabela 3.II e representam todo o circuito de cominuição, da britagem primária até a moagem de bolas.

Com base no circuito de cominuição, o custo de investimento da prensa excedeu o SABC em aproximadamente US$ 43 milhões em custo direto e em US$ 53 milhões em custo total. Esse fato é explicado pelo aumento da complexidade do sistema de transporte de material (polpa e a granel) do circuito composto pela prensa. Outro fator exacerbado é a grande quantidade de estruturas metálicas necessária para suportar a britagem secundária e terciária, incluindo os silos de estocagem de minério.

Tabela 3.II: Sumário do custo de implantação do circuito de cominuição (Vanderbeek et al, 2006)

Custo de implantação dos circuitos de cominuição (US$ x 10^6)			
Área	**SABC**	**HPGR**	**HPGR-SABC**
Britagem primária para alimentar o SAG ou silo da britagem secundária	**35,1**	**33,4**	**-1,7**
Britagem de finos			
Britagem secundária	0	37,5	
Britagem terciária (HPGR)	0	55,4	
Britagem de pebbles	23,1	0	
Sistema de alimentação do silo da moagem de bolas	0	39,6	
Total da britagem de finos	**23,1**	**132,5**	**109,4**
Moagem			
SAG	67,7	0	
Moinho de bolas	58,5	61,9	
Total da Moagem	**126,2**	**61,9**	**-64,3**
Total dos custos diretos de cominuição	**184,4**	**227,8**	**43,4**
Custos indiretos	**0**	**9,8**	**9,8**
Comparação dos custos de implantação do circuito de cominuição	**184,4**	**237,6**	**53,2**

Comparação do custo de operação

Os custos estimados de operação para as duas opções de circuitos de cominuição estão tabulados na tabela 3.III.

As potências de operação do SAG e dos moinhos de bolas foram determinadas pela Minnovex CEET, que levou em consideração uma esperada variação na dureza do minério e carga inconstante entre o SAG e o moinho de bolas.

A energia consumida associada aos equipamentos do circuito de cominuição auxiliar está incluída na análise de custo de operação.

Os equipamentos auxiliares dos circuitos SABC e prensa de rolos incluem alimentadores de recuperação, transportadores, sistemas de lubrificação e peneiras. A britagem auxiliar de *pebbles* inclui transportadores, detetor de metais e sistemas de lubrificação. Os equipamentos auxiliares de britagem secundária e terciária incluem alimentadores de correia, peneiras e sistemas de lubrificação. Os requerimentos energéticos dos sistemas de transportadores de correia e captação de pó estão detalhados separadamente.

Os custos referentes a corpos moedores, revestimentos, manutenção e operação, foram estimados, conforme apropriado, utilizando índices das usinas de Candelária e El Abra, ambas localizadas no Chile.

Os dados retirados da tabela 3.III, indicam que o circuito composto pela prensa de rolos oferece maior economia em custo de operação quando comparado ao SABC, nas áreas de energia e meios moedores.

A economia nos requerimentos energéticos foi atingida em função da maior eficiência do processo de redução de tamanho, proporcionada pelo uso da prensa de rolos. A tabela 3.III apresenta a comparação entre os custos operacionais do circuito SABC e do circuito composto pela prensa de rolos.

Tabela 3.III: Comparação do custo operacional do circuito SABC e do circuito composto pela prensa de rolos (Vanderbeek et al, 2006)

Custos operacionais dos circuitos de cominuição (US$/t)					
Dados operacionais	**Energia específica**		**Power, kW**		**SABC-HPGR**
Requerimentos energéticos	**SABC**	**HPGR**	**SABC**	**HPGR**	
Moinhos SAG	8,71	0	38,181	0	
Transportadores de minério grosso	0,5	0,5	3	2,976	
Equipamentos auxiliares de moagem	1,56	1,66	6,852	7,292	
Britadores de pebbles	0,37	0	1,79	0	
Equipamentos auxiliares da britagem de pebble	0,27	0	1,316	0	
Moinho de bolas	8,71	8,03	38,2	35,236	
Britagem secundária	0	0,49	0	2,387	
Britagem terciária (HPGR)	0	3,25	0	15,043	
Equipamentos auxiliares da britagem secundária e terciária	0	0,22	0	1,083	
Transportadores da britagem secundária e terciária	0	1,27	0	6,22	
Sistema de despoeiramento	0	0,49	0	2,25	
Potência total de operação (kW, kWh/t)	20,1	15,9	89,339	72,487	16,852
Custos energéticos (US$/t)			**0,704**	**0,557**	**0,147**
Dados operacionais	**-**		**US$/t**		**SABC-HPGR**
Custos com bolas e revestimentos					
Bolas dos moinhos SAG			0,203	0	
Bolas dos moinhos de bolas			0,176	0,164	
Revestimento do SAG e HPGR			0,132	0,141	
Revestimento do moinho de bolas			0,042	0,04	
Revestimento britagem secundária / pebble			0,012	0,015	
Total de bolas e revestimentos (US$/t)			**0,565**	**0,36**	**0,205**
Custos de operação e reparos					
Britagem de pebble / britagem secundária			0,053	0,045	
Moagem SAG / Britagem terciária (HPGR)			0,138	0,124	
Moinho de bolas			0,046	0,046	
(US$/t) Total dos custos para fornecimento de reparos e operação			**0,237**	**0,215**	**0,022**
Custos de manutenção e operação					
Britagem de pebble / britagem secundária			0,189	0,195	
Moagem SAG / Britagem terciária (HPGR)			0	0	
Moinho de bolas			0	0	
(US$/t) Total de operação + custos de mão de obra para manutenção			**0,189**	**0,195**	**-0,006**
(US$/t) Comparação dos custos operacionais do circuito de cominuição			**1,695**	**1,327**	**0,368**

Conclusão

Embora o circuito composto pela prensa de rolos tenha um custo de implantação maior do que do circuito SABC, os seus custos reduzidos de operação permitem uma taxa de retorno maior. O longo planejamento de instalação do circuito SABC causado pela demora no recebimento do moinho SAG e a grande diversidade de outros problemas operacionais relatados guiaram à conclusão de que o circuito composto pela prensa exibiu melhor economia e melhor perfil de risco quando comparado ao circuito SABC. Assim sendo, a implantação da prensa de rolos dói definida.

3.3.3. Boddington Expansion – Boddington Pty Ltd, Anglogold e Newcrest Operation Ltd

Boddington Gold Mine, ou BGM, é uma mina localizada a 100 km ao sul de Perth no lado ocidental da Austrália. É uma mina que possui grandes reservas minerais, estimadas em 726 milhões de toneladas, a 0,84 g/t de ouro e 0,11% de cobre. (Parker et al, 2001)

Foram estudadas três alternativas para o circuito de cominuição de Boddington, em ordem:

i. opção 1 - circuito SABC;

ii. opção 2 - circuito composto por pré-moagem através da prensa de rolos seguida do tradicional circuito SABC;

iii. opção 3 - circuito composto pela prensa de rolos seguida por moinho de bolas.

Opção 1 - Circuito SABC

Inicialmente os envolvidos nos estudos pareciam estar certos de que o tradicional circuito SABC seria o que melhor se adequaria às condições de Boddington.

Chegou-se a definir que o circuito seria conforme a figura 3.18. A escolha se deu principalmente em função do receio existente na época referente aos custos de revestimento e da disponibilidade da prensa de rolos.

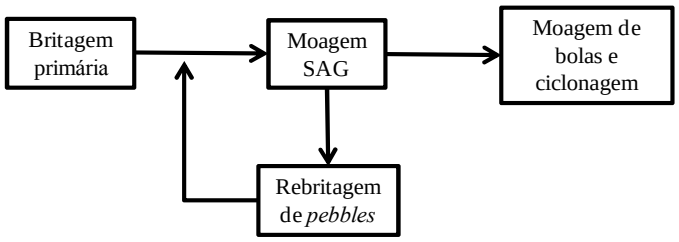

Figura 3.18 – Circuito Convencional – SABC. (Parker et al, 2001)

Ao longo dos programas de testes, foi identificado que os estudos de sondagem indicavam que a jazida era maior do que o esperado, o que acarretaria a necessidade de aumentar a capacidade da planta. Foi então necessário estudar alternativas que proporcionassem aumento da alimentação da única linha de moagem SAG, que possuía restrições em função da limitação da alimentação, em 13 MTPA. Dessa forma, surgiu a oportunidade de introduzir a prensa de rolos, antes do tradicional circuito SABC para tentar atingir ganhos de produção.

Opção 2 – Circuito composto por pré-moagem através da prensa de rolos seguida do tradicional circuito SABC

A escolha deste circuito se deu em função da necessidade do aumento substancial da capacidade da planta. Nesta etapa os envolvidos nos estudos ainda queriam preservar o máximo possível do circuito inicial.

Neste momento dos estudos, ainda existiam tantas incertezas sobre a funcionalidade da prensa de rolos, que foi previsto um *by-pass* para permitir que a britagem primária alimentasse diretamente a moagem SAG (com capacidade reduzida), para atender uma situação de indisponibilidade da prensa de rolos, conforme figura 3.19.

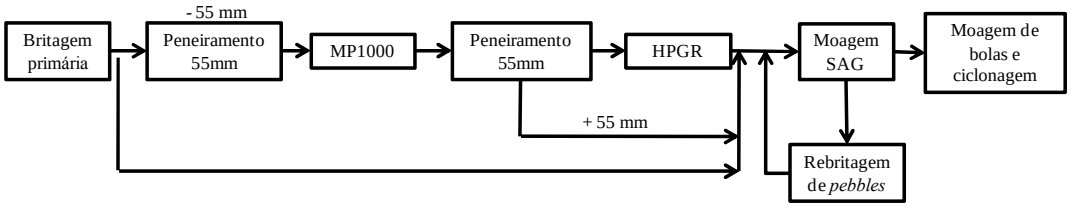

Figura 3.19 – Diagrama de blocos do circuito de cominuição Pré-moagem / Circuito SABC. (Parker et al, 2001)

Esta definitivamente não parecia a melhor opção, então começou-se a pensar na omissão do moinho SAG. Assim, iniciaram-se os estudos considerando a prensa de rolos seguida por moinhos de bolas.

Opção 3 – Circuito composto pela prensa de rolos seguida por moinho de bolas

Este circuito indicava ganhos operacionais significativos, em função de sua simplicidade. Ele também apresentou menor consumo de energia específica, o que levou a mais um programa de testes piloto. Com a evolução dos testes, foi observado que haveria benefícios quanto ao custo de implantação da planta. Um pouco mais além, identificou-se que a planta agora estaria apta processar uma alimentação nominal de até 25 MTPA.

No final dos exaustivos programas de testes, o estudo de viabilidade concluído em 2000 finalmente determinou o circuito de cominuição conforme o diagrama de blocos da figura 3.20.

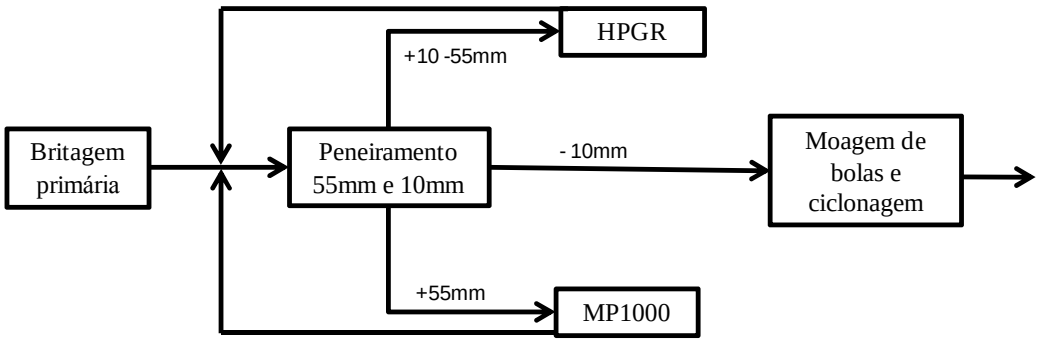

Figura 3.20 – Diagrama de blocos do circuito de cominuição Prensa de Rolos / Moinho de Bolas. (Parker et al, 2001)

Outras vantagens foram identificadas nessa aplicação, incluindo a natureza modular do circuito, que é mais flexível a futuros repotenciamentos, correção de eventuais falhas de projeto e/ou eventuais falhas nos testes de sondagem.

Os indicativos de custos operacionais e de implantação dos três circuitos que foram exaustivamente estudados estão sumariados na tabela 3.IV.

Tabela 3.IV: Custos de operação e custo de implantação dos circuitos de cominuição (Parker et al, 2001)

Custos de operação e custo de implantação dos circuitos de cominuição				
Parâmetro	**Unidade**	**SABC**	**Pré-moagem (HPGR) / SABC**	**HPGR / Moinho de bolas**
Alimentação anual	Mt/a	11,2	20,8	25
Estimativa do custo de implantação	A$/tpa	12,34	7,43	5,75
Estimativa dos custos operacionais	A$/t	4,18	3,32	2,95

Assim, os ganhos observados no circuito composto pela prensa de rolos seguida por moinhos de bolas foram:

i. a competência do minério fazia o uso da tecnologia da prensa de rolos vantajosa;

ii. o aumento da capacidade do circuito, em função do baixo teor identificado durante a prospecção de testes, requeria um circuito que aceitasse uma alimentação anual bem maior do que inicialmente esperado;

iii. os custos de implantação e operação eram bastante atraentes.

O diagrama de blocos com as operações unitárias de processo representado na figura 3.21 foi selecionado para planta de Boddington.

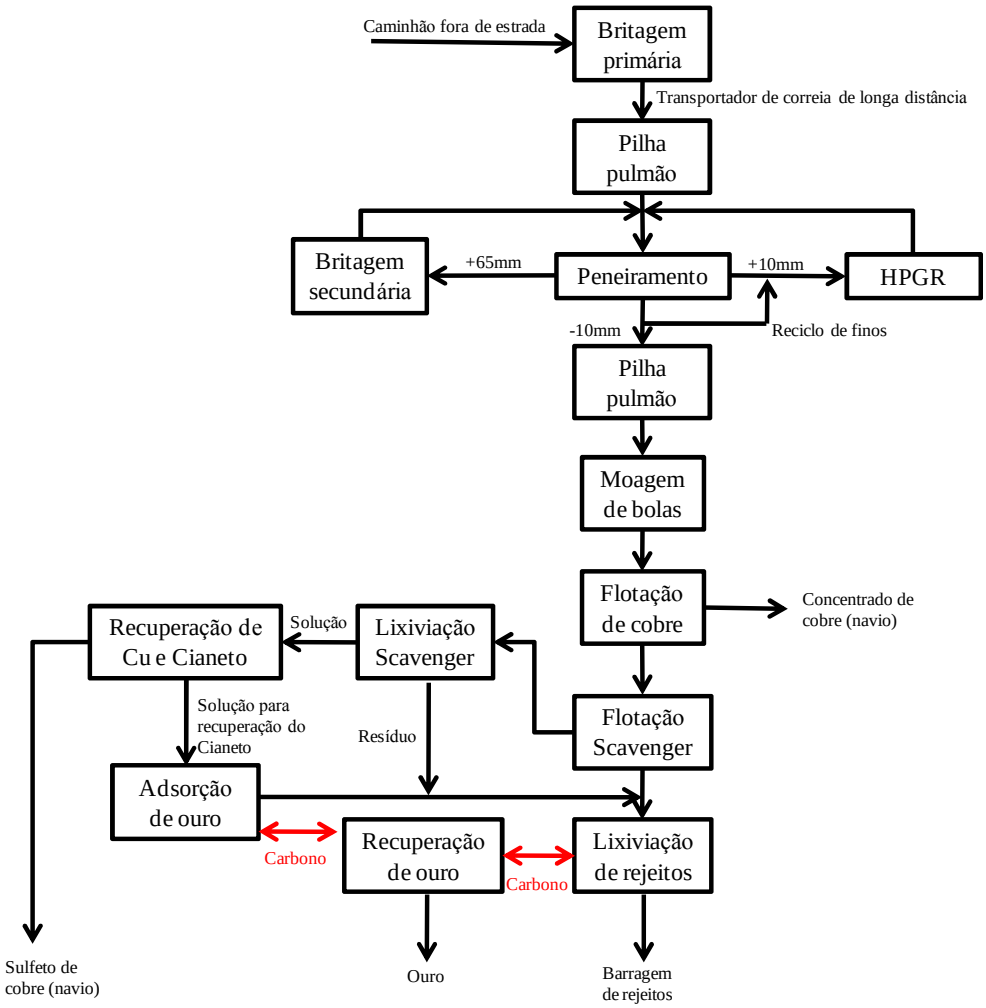

Figura 3.21 – Diagrama de blocos com as operações unitárias de processo selecionado. (Parker et al, 2001)

3.3.4. Minas-Rio – Anglo Ferrous (AFMR);

Minas-Rio é uma mina de ferro, localizada no estado de Minas Gerais, Brasil. Os estudos técnicos e econômicos envolveram as seguintes opções:

i. prensagem simples, seguida de moinho de bolas. A britagem é feita em dois estágios, sendo que o segundo fecha circuito em peneiras a 25 mm;

ii. britagem terciária com britadores Barmac, seguida de moinhos de bolas. A britagem é feita em três estágios, sendo que o peneiramento fecha circuito em peneiras a 12,5 mm a seco. O dimensionamento das peneiras leva em conta a perda de produtividade em períodos de alta precipitação;

iii. britagem terciária em britadores cônicos, após peneiramento a úmido em 10 mm, que fecha o circuito. Com o objetivo de otimizar a operação, o peneiramento é feito após a pilha pulmão.

Dimensionamento do circuito utilizando prensagem simples

Para alimentação da prensa, pode ser utilizada granulometria ao redor de 25 mm. Para tanto, bastam dois estágios de britagem. Considerou-se que a britagem primária seria composta por dois britadores de mandíbulas modelo C-140, ou similar.

Seriam necessárias 4 peneiras de 12’ de largura para fechar circuito com a britagem secundária, composta por quatro britadores HP-500.

Com base nos parâmetros de prensagem determinados, foram pré-dimensionadas três prensas com 2,4 m de diâmetro, 1,7 m de largura e 4.600 kW de potência. Este porte coloca as prensas propostas para a AFMR entre as maiores do mundo.

Para moagem do produto das prensas foram pré-dimensionados 2 moinhos com 25’ de diâmetro e 46’ de comprimento, com 21.800 CV de potência.

Dimensionamento do circuito com Barmac

Considerou-se que a britagem primária seria composta de dois britadores de mandíbulas modelo C-140, ou similar.

No caso de não utilização da prensa, seria necessária a utilização de britagem terciária fechando circuito ao redor de 12 mm. Foram pré-dimensionados dois britadores Barmac 9100 SE, sendo necessário o aumento do número de peneiras para 8 peneiras de 12’ de largura.

O passante no peneiramento seria alimentado na moagem de bolas. O A80 considerado foi de cerca de 6.200 mm. Seriam necessários três moinhos de bolas com 25’ de diâmetro e 44’ de comprimento, cada um com 19.900 CV de potência.

Dimensionamento do circuito com peneiramento a úmido e britagem terciária

Assim como nos demais estudos, considerou-se que a britagem primária seria composta por dois britadores de mandíbulas modelo C-140, ou similar.

No peneiramento primário seriam necessárias 4 peneiras de 12’ de largura para fechar circuito com a britagem secundária, composta por quatro britadores HP-500. O produto -25 mm seria empilhado e alimentaria o peneiramento secundário a úmido.

No peneiramento secundário seriam utilizadas 3 peneiras de 12’ de largura com telas de 15 mm e 10 mm, com operação a úmido, fechando circuito com 9 britadores HP-800.

O A80 da moagem cai dos cerca de 6,2 mm na alternativa Barmac para cerca de 4,3 mm, ainda que a geração de finos na britagem terciária seja menor. Como os terciários cônicos geram menos finos e o peneiramento secundário a úmido ocorre em abertura menor, houve a necessidade de maior número de equipamentos de britagem terciária: 9 HP-800.

Comparação das alternativas

A utilização ou não de prensa de rolos implica em configurações diferentes da planta. Na tabela 3.V é representado um resumo da alteração de equipamentos em cada alternativa.

Tabela 3.V: Equipamentos que compõem cada alternativa (Silvio, 2007)

	COM HPGR	COM BARMAC	PEN. ÚMIDO
Equipamentos	4 Peneiras 12'x25' x 75 CV	11 Peneiras 12'x25' x 75 CV	7 Peneiras 12'x25' x 75 CV
Rebritagem e Moagem	4 HP 500 x 500 CV	4 HP 500 x 500 CV	4 HP 500 x 500 CV
	TC 02 - 48"x200 m x 300 CV		TC 04 - 72"x100 m x 400 CV
	TC 04 - 48"x200 m x 300 CV	TC 04 - 72"x250 m x 700 CV	TC 04 - 72"x50 m x 150 CV
		TC 05 - 48"x350 m x 400 CV	
	3 HPGR 2,4 x 1,7 m x 4.600 kW	2 Barmac B9100SE x 800 CV	9 HP 800 x 800 CV
	2 Moinhos de Bolas 26'x46'x21.800CV	3 Moinhos de Bolas 25'x44'x19.900 CV	3 Moinhos de Bolas 25'x44'x18.400 CV
	40 ciclones 32"	48 ciclones 32"	72 ciclones 32"
	4 bombas 650 MMC x 3.400 CV	6 bombas 550 MMC x 3.000 CV	6 bombas 650 MCH x 4.600 CV
	4 bombas 650 MMC x 3.900 CV	6 bombas 650 MMC x 3.800 CV	12 bombas 650 MCH x 3.900 CV

Sem a utilização de prensas de rolos, há a necessidade de implantação de britagem terciária, aumentando a necessidade de transportadores de correias.

Na alternativa com peneiramento a úmido em 10 mm, a carga recirculante é grande, requerendo 9 britadores cônicos HP-800, tendo como vantagem a necessidade de apenas 3 peneiras adicionais no estágio secundário.

A tabela 3.VI representa a potência consumida para cada uma das três opções deste estudo.

Tabela 3.VI: Potência consumida (Silvio, 2007)

Potência Instalada (CV)	COM HPGR	COM BARMAC	PEN. ÚMIDO
Peneiras 12' x 25'	300	825	525
HP 500	2.000	2.000	2.000
Barmac B 9100 SE		1.600	
HP 800			7.200
TCs / ALs	600	1.100	850
HPGR 2,4 x 1,7 m	18.763		
Moinhos de Bolas	43.600	59.700	55.200
Bombas	29.200	40.800	74.400
Potência Instalada Total (CV)	**94.463**	**106.025**	**140.175**
Potência Consumida Total (kW)	**55.894**	**68.972**	**87.474**

Observa-se que a utilização da prensa de rolos permite a economia de cerca de 19% do consumo de energia deste segmento da planta.

Na tabela 3.VII estão os parâmetros utilizados para dimensionamento dos moinhos.

Tabela 3.VII: Parâmetros utilizados para dimensionar os moinhos (Silvio, 2007)

Parâmetros de dimensionamento dos moinhos	COM HPGR	COM BARMAC	PEN. ÚMIDO
WI (kWh/t)	6,0	6,0	6,0
Moagem - A_{80} (μm)	1.000	6.243	4.331
Moagem - P_{80} (μm)	100	100	100

Seria normal que houvesse alguma redução do WI após a prensagem, como indicado pelo teste com LabMill. Assim sendo, fica claro que as premissas adotadas são um tanto otimistas em relação à alternativa sem prensas.

O estudo demonstrou, conforme indicado na tabela 3.VIII, que o maior número de equipamentos implica em maior necessidade de mão de obra nas alternativas sem prensagem.

Tabela 3.VIII: Necessidade de mão de obra (Silvio, 2007)

Necessidade de mão de obra	COM HPGR	COM BARMAC	PEN. ÚMIDO
Quadro de Pessoal	20	24	28

O maior item de custo operacional serão os corpos moedores, conforme tabela 3.IX, cujo consumo foi previsto para a moagem primária.

Tabela 3.IX: Consumíveis da moagem (Silvio, 2007)

Consumíveis da moagem	COM HPGR	COM BARMAC	PEN. ÚMIDO
Corpos Moedores (g/t)	246,2	314,4	305,3
Revestimento Moinhos (g/t)	28,7	36,7	35,6

O investimento na alternativa com prensa de rolos é cerca de US$ 15 milhões menor que a alternativa com Barmac. Por último, a alternativa com peneiramento a úmido é cerca de US$ 44 milhões mais cara que a alternativa com a prensa de rolos. A tabela 3.X resume o custo de implantação de cada equipamento envolvido no estudo.

Tabela 3.X: Investimento de implantação (Silvio, 2007)

INVESTIMENTO (US$)	COM HPGR	COM BARMAC	PEN. ÚMIDO
PENEIRAS	1.201.702	3.304.681	2.102.979
BRITADORES	1.592.969	2.152.101	10.209.990
TCs	2.377.872	3.650.362	1.280.681
HPGR	20.433.698	-	-
MOINHOS	33.675.768	46.714.500	43.218.000
CICLONES	1.438.298	1.725.957	2.588.936
BOMBAS	4.025.532	5.527.660	10.059.574
INSTALAÇÃO	114.482.066	130.806.800	153.318.386
TOTAL	**179.227.904**	**193.882.061**	**222.778.546**

A tabela 3.XI apresenta a estimativa do custo operacional, conforme as premissas estabelecidas pelo cliente e pela ECM.

Tabela 3.XI: Custo operacional (Silvio, 2007)

CUSTO OPERACIONAL (US$/ano)	COM HPGR	COM BARMAC	PEN. ÚMIDO
Corpos Moedores	8.500.801	10.856.199	10.543.177
Revestimento Moinhos	7.513.334	9.595.126	9.318.464
Revestimento HPGR	7.046.835	-	-
Energia elétrica	31.532.316	38.909.865	49.348.206
Manutenção	14.133.909	16.597.964	21.891.849
Mão de Obra	265.532	318.638	371.745
TOTAL	**68.992.726**	**76.277.792**	**91.473.440**

Considerou-se o custo dos corpos moedores igual a US$ 660 / t, do revestimento US$ 5,00 / kg, da energia elétrica US$ 70 / MWh e da mão de obra US$ 13.227 / ano / empregado. O custo de manutenção foi estimado em relação ao investimento como 12% ao ano para as prensas de rolos, 40% para as bombas de polpa de finos, 70% para as bombas de polpa do *undersize* das peneiras da alternativa com peneiramento a úmido e 25% para os demais equipamentos. O custo do revestimento das prensas foi informado pela Polysius como EUR 1.280.000 por jogo de par de rolos, com vida útil garantida de 4.800 horas.

A operação com prensas possibilita redução do custo operacional em cerca de US$ 7,4 milhões por ano.

A tabela 3.XII compara o custo operacional, corrigido, das alternativas ao longo dos primeiros 20 anos de operação da planta.

Tabela 3.XII: Custo operacional – 20 anos (Silvio, 2007)

AVALIAÇÃO GLOBAL (US$)	COM HPGR	COM BARMAC	PEN. ÚMIDO
INVESTIMENTO	179.227.904	193.882.061	222.778.546
CUSTO ANUAL	68.992.726	76.277.792	91.473.440
VPL (20 anos @ 12% a.a.)	584.330.006	646.030.459	774.729.145
TOTAL	**763.557.910**	**839.912.521**	**1.088.981.132**
DIFERENÇA	**0**	**76.354.610**	**325.423.222**

A utilização de prensas de rolos adiciona em vinte anos cerca de US$ 76 milhões de dólares de valor ao projeto.

Conclusão

Com base em todas as informações contidas nesse estudo, a *Anglo Ferrous Brazil* optou pela aplicação de prensas de rolos para o projeto Minas-Rio, identificando-se as seguintes vantagens:

i. menor investimento inicial (cerca de US$ 15 milhões);

ii. menor custo operacional (diminuição de cerca de US$ 7,4 milhões de dólares por ano);

iii. benefício esperado ao longo de vinte anos: cerca de US$ 76 milhões;

iv. menor número de equipamentos: eliminação do estágio terciário de britagem e menor número de peneiras primárias;

v. maior estabilidade do processo diante de possíveis variações do minério em relação ao WI e distribuição granulométrica;

vi. menor necessidade de mão de obra.

3.4. Consolidação da tecnologia

O primeiro indício de que a aplicação das prensas de rolos está cada vez mais consolidada na indústria mineral é a sua presença nas rotas de processo de renomadas mineradoras. Segundo Klymowsky et al (2008), a Polysius atualmente possui prensas de rolos em operação ou em implantação nas seguintes plantas:

Newmont Mining :	Ouro
Anglo Gold :	Ouro
Freeport Mc Moran :	Ouro / Cobre / Molibdênio
Gold Fields :	Ouro
Anglo American :	Platina
DeBeers :	Diamante
RTZ :	Diamante
Goldcorp :	Ouro
AFMR :	Ferro
Vale :	Ferro / Cobre
Samarco :	Ferro
Gindalbie :	Ferro
Molymines :	Molibdênio

Recentemente, as seguintes plantas foram comissionadas:

Cobre – Ouro

Cerro Verde I:	4 prensas de 2,4 m de diâmetro	4º quadrimestre de 2006
PT Freeport:	2 prensas de 2,0 m de diâmetro	2º quadrimestre de 2007
Boddington:	4 prensas de 2,4 m de diâmetro	1 º quadrimestre de 2009

Platina

Anglo Platinum:	1 prensa de 2,2 m de diâmetro	1º quadrimestre de 2008
Northam Platinum:	1 prensa de 0,9 m de diâmetro	2º quadrimestre de 2008

As seguintes prensas de rolos, fornecidas pela Polysius, se encontram em fase de implantação:

Minério de ferro

Gindalbie : Projeto Karara - 2 prensas de 2,4 m de diâmetro

AFMR: Projeto Minas Rio - 3 prensas de 2,4 m de diâmetro

Minério de Molibdênio

Moly Mines : Projeto Spinifex Ridge - 3 prensas de 2,4 m de diâmetro

Minério de cobre

Vale : Projeto Salobo - 2 prensas de 2,0 m de diâmetro

Minério de ouro

Gold Corp : Peñasquito – 1 prensa de 2,4 m de diâmetro, utilizada para rebritagem de *pebbles*

Além dos equipamentos em operação ou em implantação, pode-se dizer que os estudos técnico-econômicos que consideram a prensa de rolos fazem parte do cotidiano das empresas de engenharia.

Segundo a Polysius, o número de prensas de rolos instaladas na indústria mineral é crescente, conforme figura 3.22.

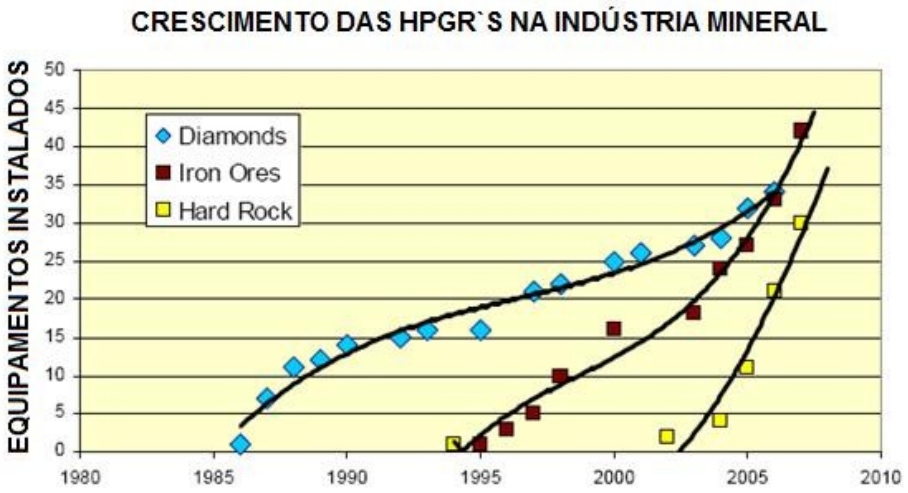

Figura 3.22 – Número de prensas de rolos implantadas na indústria mineral correspondente ao ano de implantação. (Klymowsky et al, 2008)

Com base nos dados citados neste item, pode-se afirmar que o crescimento do número de prensas de rolos implantadas ao longo dos anos deixa de ser um indicador da consolidação da tecnologia e passa a ser uma confirmação.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho procura comparar dados de diversas plantas de mineração onde se comprovou a aplicação da prensa de rolos de alta pressão e elaborar um quadro referencial para permitir que o estudo de implantação do equipamento, ainda em fase inicial de projeto, avance, ou seja descartado.

Os resultados deste trabalho foram extraídos de relatórios de testes de fabricantes e de estudos realizados pela empresa de engenharia e consultoria ECM S.A. – Projetos Industriais. O estudo é composto pela análise de dados das seguintes minas:

i. Vale – Salobo;

ii. Phelps Dodge – Cerro Verde;

iii. Anglo Ferrous – Minas Rio.

A comparação dos dados das minas citadas leva em consideração:

Os itens referentes à caracterização do minério

i. competência do minério;

ii. umidade e Plasticidade do minério;

iii. presença significativa de magnetita intrínseca ao bem mineral;

iv. índices de abrasividade.

Análise econômica dos empreendimentos

i. benefícios econômicos advindos do CAPEX;

ii. retorno de OPEX ao longo do ciclo de vida útil da planta.

Diversos outros itens a serem avaliados

i. ganhos advindos do LayOut da planta;

ii. possibilidade de adaptação às variações do minério que potencialmente comprometam a produção esperada;

iii. complexidade de soluções estruturais para as fundações;

iv. complexidade da utilização de grandes motores elétricos.

4.1. Casos a serem estudados

As minas selecionadas representam grande parte dos estudos que estão em desenvolvimento: Prensa de Rolos versus Moagem AG/SAG e Prensas de Rolos versus Etapas de Britagem/Pré-Moagem.

Salobo e Cerro Verde

Salobo e Cerro Verde têm aplicações similares. Ambas as instalações são para processamento de minério de cobre e consideram a pré-moagem através da prensa de rolos em detrimento a moagem AG/SAG. Similaridades entre as duas plantas são observadas:

i. o *top size* de alimentação da prensa para as duas plantas é em torno de 50 mm;

ii. o produto da prensa passa por uma etapa de peneiramento. O retido fecha circuito com a prensa de rolos e o passante vai para a moagem de bolas.

Minas Rio

O empreendimento Minas-Rio processa minério de ferro e considera a prensa de rolos em detrimento a etapas adicionais de britagem / pré-moagem. O *top size* da alimentação da prensa é menor do que 25 mm, e, essa planta toma vantagem da simplicidade do circuito de cominuição que considera o produto da prensa de rolos alimentando diretamente a moagem de bolas, isto é, sem a necessidade de uma operação de peneiramento intermediária.

4.2. Análise dos resultados dos testes

De maneira geral, é recomendável que a análise dos dados recebidos pelo fabricante considere pelo menos os seguintes parâmetros:

i. capacidade específica;

ii. consumo energético específico;

iii. força específica da moagem;

iv. distribuição granulométrica no centro e nas bordas dos rolos;

v. taxa de desgaste do revestimento;

vi. tamanho do produto;

vii. redução no *bond ball mill work index* – BWI;

viii. considerações específicas do projeto;

ix. dimensionamento do equipamento.

Salobo

As informações dos testes de Salobo se depreendem do relatório gerado pela empresa de engenharia consultiva SMCC Pty Ltd, que por sua vez, utilizou como referência dados obtidos dos relatórios de testes da Polysius:

i. utilizou-se uma máquina com rolos de 0,71 m de diâmetro e 0,21 m de largura, com velocidade de 0,29 m/s;

ii. a capacidade específica considerada foi de 221 t.s / (h.m³) para o primeiro ano e 213 t.s / (h.m³), conservadoramente, para o ano em que o minério extraído for mais duro, de acordo com as estimativas do plano de lavra;

iii. o consumo específico considerado foi de 3,01 kWh/t para o primeiro ano e 3,08 kWh/t para o ano em que o minério extraído for mais duro, de acordo com as estimativas do plano de lavra;

iv. a força específica da moagem foi da ordem de 3,7 N/mm²;

v. a relação entre a força específica da moagem e o consumo específico de energia é de 1,25;

vi. os testes indicam que o produto final da prensagem P80 (*undersize* do peneiramento), é de cerca de 4.000 μm;

vii. o teste ATWAL apresentou consumo de 10,8 g/t, quando a umidade considerada foi de 2,5%;

viii. com base nos resultados da ATWAL, a Polysius deu garantia de 6.500 – 8.000 horas, considerando redução máxima no comprimento dos *studs* de 35 mm;

ix. foram especificadas 2 prensas de 2 m x 1,5 m;

x. o resultado do teste de moagem LabMill não indicou ganhos na moagem, o que se observou foi uma diferença de consumo energético geral da planta, em função dos equipamentos utilizados, proporcionando economia de 3,5 – 5 kWh/t, dependendo das características do minério.

Cerro Verde

As informações dos testes de Cerro Verde foram extraídas do artigo *HPGR Implementation At Cerro Verde,* por Vanderbeek et al (2006), que por sua vez, foram retiradas de testes de diversos fabricantes:

i. foram realizados 31 testes de bancada, com três prensas em escala piloto, cuja variação do diâmetro se encontrava entre 0,60 e 0,80 mm. Duas destas prensas possuíam rolos com *studs* e a terceira prensa possuía rolos com revestimento do tipo Hexadur;

ii. com os testes realizados foi observado que a alimentação específica apresentou ligeira redução com o aumento da força específica. A energia específica aumentou linearmente com o aumento da força específica. O aumento da umidade de 2% para 4% resultou na redução de 5% na alimentação específica e aumento de 20% na energia específica. O aumento da velocidade dos rolos de 0,4 m/s para 1,4 m/s resultou numa ligeira redução na alimentação específica, em função do escorregamento;

iii. a capacidade específica, dependendo do fabricante, ficou entre 230 e 250 t.s / (h.m³);

iv. o consumo específico considerado nos testes ficou entre 1,7 e 2,0 kWh/t;

v. a força específica da moagem foi da ordem de 3,5 e 4,0 N/mm²;

vi. considerando um valor médio para a força específica e para o consumo específico de energia, a relação encontrada é de 2,0;

vii. o minério de Cerro Verde foi classificado pelos fabricantes como mediamente abrasivo;

viii. com base nos resultados dos testes de abrasividade dos fabricantes, a vida útil do revestimento foi estimada em 6.000 horas;

ix. foram especificadas 2 prensas de 2,4 m x 1,6 m.

Minas Rio

Das informações recebidas pela Polysius durante a etapa de testes, depreendem-se os seguintes parâmetros básicos:

i. utilizou-se nos testes uma máquina com rolos de 0,71 m de diâmetro, 0,21 m de largura, operando com velocidade periférica de 0,29 m/s;

ii. a capacidade específica é função da umidade de alimentação da prensa. Até 6% de umidade, a capacidade é da ordem de pouco menos de 327 t.s / (h.m³), caindo bruscamente acima desta umidade;

iii. o consumo específico de energia para umidade de 6% foi de 1,27 kWh/t, subindo acima de 1,35 kWh/t com o aumento de umidade. Com a umidade de 7% obteve-se 1,37 kWh/h, que foi utilizado no pré-dimensionamento da prensa. A força específica foi de 3,48 N/mm² para 6% de umidade, caindo com aumento da umidade para 3,29 N/mm² com 8% de umidade;

iv. a relação entre a força específica da moagem e o consumo específico de energia é de 2,49;

v. a força aplicada foi ao redor de 500 kN;

vi. considera-se como referência para estimativa do desempenho industrial a distribuição granulométrica do produto do centro da prensa piloto, pois em escala industrial a influência da zona de borda é muito reduzida;

vii. a distribuição granulométrica do produto de prensagem simples, com umidade entre 7% e 8%, apresenta A80 ao redor de 1.000 μm;

viii. o teste ATWAL apresentou consumo de 31 g/t e a Polysius deu garantia de 4.800 horas de duração do revestimento;

ix. foram especificadas 3 prensas de 2,4 x 1,7 m x 4.000 kW;

x. o preço do revestimento para o par de rolos foi de EUR 1.280.000;

xi. o resultado do teste LabMill indicou economia de cerca de 40% da energia na moagem subsequente, após duas prensagens. A Polysius estimou que esta diferença deve-se se situar entre 25% e 30% para uma só prensagem.

4.3. Itens referentes à caracterização do minério

Pelas peculiaridades de cada minério, a sua caracterização é o ponto de partida para a correta definição do circuito de cominuição.

4.3.1. Competência do minério

Quando há comprovação da dureza elevada do minério ou incertezas sobre a sua variação ao longo da mina, a prensa de rolos adquire vantagens sobre os demais circuitos, uma vez que a alta e constante pressão aplicada ao leito de material é suficiente para quebrar partículas minerais de dureza mais elevada.

Segundo Danilkewich e Hunter (2006), é vantajosa a aplicação da prensa de rolos quando o BWI - *Bond Ball Mill Work Index* for maior do que 15 kWh/t. Minérios de menor competência e *Work Indexes* menores podem não se beneficiar das vantagens que a prensa proporciona.

Prensa de Rolos versus Moagem AG/SAG

A alta dureza do minério, ou a variação de sua dureza ao longo da mina, podem ser prejudiciais ao circuito SABC, pois os minérios muito competentes não são cominuídos e após certo tempo sobrecarregam o moinho SAG, minimizando a sua eficiência. É necessário então retirar os chamados *pebbles* do circuito, transferindo-os para uma etapa de rebritagem. Assim, se o minério for muito competente, a rebritagem de *pebbles* fica sobrecarregada. Se a dureza do minério variar muito ao longo da mina, será necessário que um número maior de britadores cônicos sejam implementados para absorver variações momentâneas decorrentes da frente de lavra. O circuito pode passar a funcionar a maior parte do tempo com um pequeno número de britadores cônicos para atender a rebritagem dos *pebbles*, porém precisará ser dimensionado para atender a situação mais crítica.

Salobo

Em Salobo, o BWI do minério pode extrapolar 20,8 kWh/t, conforme tabela 4.I.

Tabela 4.I: Dureza do Minério – Plano de Lavra (Morrell, 2006)

Ano	BWi (kWh/t)	DWi
1	20,16	10,68
2	19,99	10,47
3	20,03	10,57
4	19,94	10,10
5	20,06	10,03
6-10	19,74	10,35
11-15	19,65	9,64
teste piloto	19,4	8,94
80º Percentil	20,8	12,7

Nota:

Um percentil é uma medida de posição relativa de uma unidade observacional em relação a todas as outras. Se o BWI do 80º percentil é 20,8 kWh/t, 80% das amostradas possuem BWI abaixo de 20,8 kWh/t e 20% das amostras possuem BWI acima de 20,8 kWh/t. O mesmo conceito é aplicável ao DWi.

Cerro Verde

Em Cerro Verde, o BWI do minério é considerado alto, em média 15,5 kWh/t. Durante os testes, não foi mencionado se houve variação da dureza do minério.

Prensa de Rolos versus Etapas Adicionais de Britagem/Pré-Moagem

Nesta situação pode acontecer aumento das etapas de britagem e aumento do tamanho da moagem. O minério do empreendimento Minas Rio apresenta BWI baixo e ainda assim, o estudo técnico econômico realizado indicou benefícios financeiros e operacionais. Contra duas etapas de britagem, etapa de prensagem e moagem de bolas (dois moinhos), foi contraposto um circuito que possuía três etapas de britagem e uma moagem mais robusta, composta por três moinhos de bolas. Analisando detalhadamente percebe-se que além do maior número de moinhos de bolas, o segundo circuito possui maior número de britadores cônicos e peneiras, utilizadas na britagem terciária, maior número de bombas de polpa e hidrociclones, utilizados na moagem e, finalmente, maior número de equipamentos de manuseio a granel, o que aumentaram significativamente o custo de implantação do empreendimento e o custo operacional da planta.

Minas Rio

No caso da planta Minas-Rio, o minério proveniente da mina possui BWI baixo, de 6,0 kWh/t.

Durante os testes de lavra não foram identificados valores significativos de variação da dureza do minério.

4.3.2. Umidade / Plasticidade do minério

A prensa de rolos é um equipamento que não se aplica a minérios muito úmidos e pegajosos, assim, o controle correto da umidade e da plasticidade do minério na alimentação da prensa é muito importante.

Segundo Oliveira et al (2005), a alimentação do equipamento deve, preferencialmente, conter umidade em torno de 0,5% a 11%, o ideal é que se consiga atingir uma média de 5%. O funcionamento da prensa de rolos com valores elevados de umidade e com alta pressão de operação pode conduzir o material a um fluxo em sentidos diferentes do desejado, através da extrusão do material por entre os rolos.

Para verificar se o minério é pegajoso, é recomendável a verificação de sua plasticidade. A plasticidade do minério está relacionada aos coeficientes de atrito entre as partículas minerais. Ela pode ser verificada com o auxílio de um teste disponível para determinar a plasticidade de solos. A norma que descreve o teste é a DNER-ME 082/94.

Resumidamente, o teste funciona da seguinte forma:

i. uma amostra de material é misturado a água destilada, em quantidade suficiente para se obter massa plástica. O material deve ser misturado até completa homogeneização;

ii. separa-se cerca de 20 g da amostra obtida e rola-se essa massa com a ajuda dos dedos para frente e para trás. O número de rolagens deve ser compreendido entre 80 e 90 por minuto;

iii. quando a amostra se fragmentar, determina-se a umidade da amostra;

iv. o teste é repetido até serem obtidas três amostras que não se difiram da média de umidade de 5%.

O limite de plasticidade é expresso pela média dos teores de umidade obtidos, onde se classifica a plasticidade do solo em: plástico e não plástico.

4.3.3. Presença significativa de magnetita intrínseca ao bem mineral

Prensa de Rolos versus Moagem AG/SAG

Dependendo do fluxo de *pebbles* magnéticos presentes no minério proveniente da mina, a reintegração desse material ao circuito é muito importante. Em função da intrínseca associação da magnetita com o bem mineral, esses *pebbles* podem ter alto valor agregado e se a quantidade for significativa não podem ser desprezados.

Caso o *pebble* magnético não esteja associado ao bem mineral, ele deve ser retirado do circuito, uma vez que ele possui pouco ou nenhum valor agregado. Nesse caso, os *pebbles* apenas sobrecarregam o circuito.

Salobo

O alto percentual de *pebbles* magnéticos presentes no minério de Salobo foi um fator determinante para a escolha do circuito composto pela prensa de rolos. O problema foi inicialmente detetado em outra mina de cobre, a mina do Sossego, que tratava um material com aproximadamente 2 ou 3% de magnetita intrínseca ao cobre. Em Salobo, estima-se que esse percentual pode chegar a 35%, dependendo da frente de lavra, o que potencializaria inúmeras vezes o problema ocorrido na mina do Sossego.

O problema se dá pelo fato dos extratores de sucatas, instalados a montante da rebritagem de *pebble*s para retirada dos pedaços de corpos moedores, com o intuito de protegê-los contra avarias, retirarem grande quantidade de minério que possui valor agregado.

No circuito HPGR, o produto da prensa de rolos já está numa faixa granulométrica menor, o que descarta a necessidade do minério passar pela rebritagem de *pebbles*.

O circuito composto pela prensa de rolos possui maior flexibilidade quando grande quantidade de magnetita estiver presente no bem mineral.

A presença de magnetita intrínseca ao bem mineral não foi uma item aplicável aos empreendimentos minerais de Cerro Verde e Minas Rio.

4.3.4. Análise dos índices de abrasividade

A análise dos índices de abrasividade está diretamente relacionada à vida útil do revestimento dos rolos da prensa. Quanto mais altos forem os valores do índice de abrasividade menor tende a ser a vida útil do revestimento.

Apesar dos visíveis avanços, sabe-se que esse assunto ainda é preocupante, pois um revestimento de baixa vida útil pode causar não somente prejuízos em função de seu elevado custo de reposição, mas pode refletir principalmente na disponibilidade do equipamento, alterando o regime operacional da planta.

De acordo com a classificação da Polysius, o índice ATWI abaixo de 10 g/t é tido como de baixa abrasividade, entre 10 e 40 g/t é tido como de média abrasividade e acima de 40 g/t como de alta abrasividade.

Salobo

O índice de abrasividade de Salobo é de 10,8 g/t, o que o caracteriza como um minério de baixa para média abrasividade.

Cerro Verde

Os dados de Cerro Verde não foram disponibilizados.

Minas Rio

O índice de abrasividade do minério do empreendimento Minas Rio, conforme o relatório de testes da Polysius, é de 31 g/t, o que o caracteriza como um minério de média para alta abrasividade.

4.4. Análise econômica dos empreendimentos

Custo de implantação - CAPEX

Capex é uma sigla derivada da expressão *Capital Expenditure*, que dentro do contexto do presente trabalho significa o capital utilizado para implantar uma planta de mineração. O Capex inclui, por exemplo, o preço dos equipamentos prontos para entrada em operação, o custo dos componentes elétricos e de tubulação, o custo referente à montagem eletromecânica e o custo referente às obras civis, terraplanagem, contingências e outros.

Custo operacional - OPEX

Opex é uma sigla derivada da expressão *Operacional Expenditure*, que dentro do contexto do trabalho representa o capital despendido com os custos operacionais, como: mão de obra, manutenção, consumo de energia, peças de reposição, corpos moedores e outros.

Uma análise dos estudos apresentados neste trabalho permite generalizar que embora o custo para implantação do empreendimento seja mais alto (na maioria dos casos), os benefícios financeiros são alcançáveis com redução nos custos operacionais, principalmente a economia energética. A redução do Opex se beneficia quando, por fatores regionais, o custo pela energia unitária for elevado.

Ciclo de vida útil da planta

Associado ao CAPEX e ao OPEX está o ciclo de vida útil da planta. Caso o custo de implantação da prensa de rolos seja mais elevado, a planta precisa ter um ciclo de vida útil que permita diluir no tempo o investimento necessário para implantação.

Apesar do impacto financeiro de um empreendimento ser de suma importância, o estudo deve ser sempre técnico/econômico nunca se limitando apenas ao lado econômico, pois cada item descrito neste capítulo pode definir a utilização da prensa de rolos através de sua peculiaridade.

Salobo – Vale

Os dados econômicos de Salobo não foram disponibilizados.

Cerro Verde

Em Cerro Verde, o custo de implantação da prensa de rolos foi US$ 53 milhões mais alto do que o custo necessário para implantar o circuito AG/SAG, no entanto, economias operacionais da ordem de US$ 0,368/tonelada de minério tratado seriam atingíveis com a implantação do circuito composto pela prensa de rolos. Segundo Vanderbeek et al (2006), como o ciclo de vida útil de Cerro Verde é estimado em mais de 30 anos e a atual reserva delineada é de 1,4 bilhão de toneladas com 0,49% Cu, o investimento será diluído ao longo do tempo.

Uma conta direta indica que o reduzido OPEX de Cerro Verde proporcionaria um retorno de US$ 253 milhões ao longo dos 30 anos, ou, aproximadamente US$ 8,5 milhões por ano.

Minas Rio

Resumidamente, o circuito composto pela prensa de rolos adquiriu vantagens sobre o circuito composto por britagem terciária, nos seguintes aspectos:

i. menor investimento inicial, cerca de US$ 15 milhões;

ii. menor custo operacional, diminuição de cerca de US$ 7,4 milhões por ano;

iii. cerca de US$ 76 milhões de benefícios esperados ao longo de 20 anos.

4.5. Diversos outros itens a serem avaliados

4.5.1. Ganhos advindos do *layOut* da planta

Quase como um pré-requisito para se iniciar qualquer obra, é desejável que a área necessária para implantar o empreendimento seja a menor possível, para minimizar os trabalhos de movimentação de terra, em função de custo, restrições geográficas e não menos importante, por questões ambientais.

Prensa de Rolos versus Moagem AG/SAG

De maneira geral, os circuitos que consideram a prensa de rolos em detrimento à moagem SAG possuem maior número de transportadores de correia e operações de peneiramento, no entanto, a disposição da planta é mais compacta e aproveita melhor a área disponível.

Salobo e Cerro Verde

Ambas as alternativas de cominuição estudadas poderiam ser implantadas nas áreas disponíveis. No caso de Salobo havia uma pequena diferença na quantidade de movimentação de terra (a mais para a alternativa SAG), que era refletida no CAPEX.

Prensa de Rolos versus Etapas Adicionais de Britagem/Pré-Moagem

Minas Rio

Durante a elaboração dos estudos técnicos e econômicos não foram contemplados pela ECM – Projetos Industriais aspectos como impacto do arranjo e movimentação de terra. Foi considerado que um estudo menos amplo, com base apenas em equipamentos e índices, seria suficiente e não alteraria o resultado final do trabalho, uma vez que a movimentação de terra não seria significativa.

4.5.2. Possibilidade de adaptação às variações do minério que potencialmente comprometam a produção esperada.

A caracterização inadequada ou pouco abrangente da jazida pode levar à construção de uma planta inadequada, cujos ajustes necessários podem ser muito complicados.

Prensa de Rolos versus Moagem AG/SAG

Por causa das dimensões avantajadas dos moinhos AG/SAG, após a implantação do projeto, é complicado realizar ajustes para corrigir possíveis erros, requerendo-se para essa hipótese um investimento adicional considerável. A prensa de rolos consegue lidar melhor com as variações do minério e a instalação de uma prensa adicional é menos impactante no *layout* da planta.

Salobo, Cerro Verde e Minas Rio

Das três plantas estudadas, apenas Salobo aparenta processar um minério problemático, assim, o circuito de cominuição composto pela prensa de rolos foi a melhor opção para lidar com qualquer tipo de variação do minério que venha a comprometer a produção da planta.

4.5.3. Complexidade de soluções estruturais para as fundações

Prensa de Rolos versus Moagem AG/SAG

As cargas dinâmicas geradas pelos moinhos SAG são maiores do que as cargas geradas pela prensa de rolos. As cargas não refletem apenas nas fundações (CAPEX), mas também nos prazos de construção.

Salobo, Cerro Verde e Minas Rio

Em nenhuma das três plantas foram registrados ganhos no cronograma de obra e os estudos econômicos não foram levados ao ponto de analisar benefícios financeiros nas fundações.

4.5.4. Complexidade advinda da utilização de grandes motores elétricos

Prensa de Rolos versus Moagem AG/SAG

Deve ser enfatizado que moinhos AG/SAG requerem um único e grande motor para serem acionados. Geralmente, os fabricantes de inversores de frequência não possuem disponíveis em sua linha de produtos, inversores para motores de potências tão elevadas. Há necessidade do moinho AG/SAG ser acionado por ciclo conversor.

O ciclo conversor exerce papel semelhante ao do inversor de frequência, a diferença é que os harmônicos dos inversores são mais previsíveis e fáceis de serem filtrados.

Embora não exista restrição técnica para o uso de ciclos conversores, atenção especial deve ser dada aos problemas de fragilidade do fornecedor de energia elétrica local. No *start up* da mina de Sossego, no Pará, ocorreram picos de energia na central de abastecimento, que fica à aproximadamente 120 km da planta, causando variações de tensão na rede elétrica. Quando essas variações se encontravam com as variações de tensão causadas pelos harmônicos gerados pelo ciclo conversor, o moinho SAG parava repentinamente, e a cada parada, aumentava-se o risco de ocorrem avarias no

equipamento. Esse fato pode ser relacionado à fragilidade da central de fornecimento de energia, um problema regional, típico da região norte do Brasil.

As prensas de rolos possuem motorizações de até 3.000 kW por rolo. Para motores dessa magnitude, não há restrições para a utilização dos inversores de frequência.

Salobo

Os problemas com o fornecimento de energia para a planta de Salobo se tornaram previsíveis, pelo fato dela estar localizada na mesma região da planta de Sossego.

Cerro Verde e Minas Rio

Em Cerro Verde e Minas Rio não foram identificados problemas com o fornecimento de energia elétrica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas tabelas 5.I, 5.II e 5.III estão tabulados os resultados discutidos ao longo do item 4 do presente trabalho:

5.1. Itens referente à caracterização do minério

Tabela 5.I: Resumo dos itens referentes à caracterização do minério (Gomes, 2010)

	Valores de referência	Salobo	Cerro Verde	Minas Rio
Competência do minério				
. BWi	justificável a aplicação da prensa quando for > 15kWh/t	20 kWh/t (sim)	15,5 kWh/t (sim)	6 kWh/t (não)
. Variação da dureza do minério ao longo da mina		identificado	não identificado	não identificado
Umidade	5 % média	2,5	4	7
Plasticidade do minério	-	Não verificado	Não verificado	Não verificado
Presença significativa de magnetita intrínseca ao bem mineral	-	sim	não aplicável	não aplicável
Índices de abrasividade	< 10 g/t baixa abrasividade >10 <40 g/t média abrasividade > 40 g/t alta abrasividade	10,8 g/t baixa/média abrasiidade	não disponibilizado	31 g/t média/alta abrasividade

No empreendimento Salobo e Cerro Verde, a prensa de rolos se beneficiou do BWI maior do que 15 kWh/t, conforme citado por Danilkewich e Hunter (2006). No empreendimento Minas Rio, o BWI foi abaixo da referência.

A variação da dureza do minério ao longo dos anos e a presença de *pebbles* magnéticos intrínsecos ao bem mineral foram problemas exclusivos de Salobo.

A umidade do minério das três plantas está na faixa citada por Oliveira et al, (2005), entre 0,5% a 11%, próximo do ideal de 5%.

Em função do índice de abrasividade, a expectativa da vida útil do revestimento dos rolos das prensas de Salobo é de 6.500 a 8.000 horas, enquanto para o Minas Rio é de 4.800 horas.

Embora o índice de abrasividade de Cerro Verde não tenha sido divulgado, os fabricantes responsáveis pelos diversos testes, esperavam atingir 6.000 horas de vida útil de revestimento.

5.2. Análise econômica dos empreendimentos

Tabela 5.II: Resumo da análise econômica dos empreendimentos (Gomes, 2010)

	Salobo	**Cerro Verde**	**Minas Rio**
Benefícios econômicos advindos do CAPEX	não disponibilizado	não (- US$ 53 milhões)	sim (US$ 15 milhões)
Retorno de OPEX ao longo da vida útil da planta	não disponibilizado	sim (US$ 253 milhões ao longo de 30 anos)	sim (US$ 76 milhões ao longo de 20 anos)

A aplicação da prensa de rolos em Cerro Verde gerou um aumento no CAPEX de US$ 53 milhões e economias no OPEX de US$ 253 milhões (durante os 30 anos de vida útil da planta). Assim, ficou constatado que o investimento inicial mais alto seria facilmente diluído ao longo dos anos.

No Minas-Rio, a aplicação da prensa de rolos foi benéfica tanto para o CAPEX quanto para o OPEX. A redução se deu por causa da simplicidade do circuito, que possuía menor número de equipamentos e equipamentos menos robustos.

Os dados econômicos de Salobo não foram disponibilizados. Sabe-se apenas que o circuito de cominuição composto pela prensa de rolos requereu maior investimento para implantação e que se beneficiou do menor custo operacional.

5.3. Itens diversos a serem avaliados

Tabela 5.III: Resumo dos itens diversos a serem avaliados (Gomes, 2010)

	Salobo	**Cerro Verde**	**Minas Rio**
Ganhos advindos do *layout* da planta	pouco significativo	pouco significativo	não avaliado
Possibilidade de adaptação às variações do minério que potencialmente comprometam a produção esperada	sim	sim	não aplicável
Complexidade de soluções estruturais para as fundações			
. Benefícios econômicos	não avaliado	não avaliado	não aplicável
. Ganho no cronograma da obra	não avaliado	não avaliado	não aplicável
Complexidade advinda da utilização de grandes motores elétricos	sim	não	não

Os itens discutidos neste tópico são complementares. Na verdade, eles devem ser considerados para detetar particularidades, normalmente não impeditivas para evolução dos estudos, pois:

i. os ganhos advindos do *layout* da planta, normalmente, são pouco significativos, a não ser que existam sérias questões ambientais e/ou limitações geográficas para a implantação do empreendimento mineral;

ii. a possibilidade de correção da planta está relacionada a falhas de caracterização do minério. São erros humanos que podem ser minimizados;

iii. os impactos causados pelas fundações no empreendimento estão relacionados à eficiência do cronograma de obra e plano de aquisição de equipamentos;

iv. a complexidade da utilização de grandes motores elétricos está relacionada a problemas locais de fornecimento de energia.

6. CONCLUSÕES

Dos quadros analisados no capítulo 5, conclui-se que:

i. os itens referentes à caracterização do minério podem em casos específicos justificar o uso da prensa de rolos. O empreendimento Salobo retrata bem esta situação, pois a quantidade de magnetita intrínseca ao bem mineral e a variação da dureza do minério ao longo da jazida tiveram um peso muito grande na definição do uso da prensa de rolos;

ii. o BWI do minério não necessariamente precisa ser elevado para justificar a utilização do equipamento. O empreendimento Minas Rio ilustra essa afirmativa, pois obteve vantagens econômicas no CAPEX e no OPEX, independentemente do BWI.

A utilização da prensa de rolos pode se justificar por fatores técnicos, econômicos ou na maioria dos casos, pelo somatório de ambos. A maior certeza que se tem atualmente é que a sua utilização tende a se tornar viável nos circuitos simples, por exemplo, onde a moagem de bolas é alimentada diretamente pelo produto da prensa, como acontece no empreendimento Minas-Rio. Esse tipo de circuito se beneficia da quantidade de finos gerados pela prensa e culmina na redução do número e tamanho de moinhos de bolas a serem utilizados, atingindo reduções nos custos operacionais e de implantação, conforme tabela 5.II.

Os circuitos de Salobo e Cerro Verde são mais complexos e tendem a onerar o empreendimento. O produto da prensa apresenta grande quantidade de finos e algum grau de agregação, que varia dependendo do minério. Se o produto da prensa for peneirado a úmido, o *oversize* da peneira retornará água à alimentação da prensa contribuindo em demasia para o desgaste do revestimento dos rolos.

7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

A prensa de rolos surgiu como uma opção para os circuitos de cominuição e, atualmente, se consolidou como uma realidade no cotidiano das empresas de engenharia, sendo crescente o número de equipamentos instalados.

A importância deste trabalho, como um todo, não se restringe apenas à relevância dos resultados finais. As informações sobre a prensa de rolos estão disponibilizadas no mercado através de artigos técnicos, redigidos por diversos autores. Muitas vezes as informações são contraditórias, desatualizadas e quase sempre estão redigidos na língua inglesa. Este trabalho filtrou e aglutinou o que há de consistente nesses materiais.

Não existe uma regra direta para determinar se a prensa de rolos é o equipamento que melhor se adéqua a uma determinada planta. O que se pode dizer é que aparentemente esse equipamento apresenta vantagens indiscutíveis em circuitos simples, e que para todas as outras aplicações apenas o somatório de todos os itens descritos ao longo da metodologia desse trabalho pode conduzir à escolha do melhor circuito.

O modelo proposto, apesar de ser orientativo, é um recurso para pré-definir o circuito de cominuição, através da deteção de similaridades entre plantas que usufruem da tecnologia da prensa de rolos. O processo agrega agilidade às tomadas de decisões em uma etapa preliminar de estudos, antecipando resultados de testes realizados pelos fabricantes de prensas de rolos.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os recentes avanços na tecnologia utilizada no revestimento dos rolos têm mudado o cenário da indústria mineral, tornando a prensa de rolos uma alternativa viável para competir e quiçá substituir as rotas de fragmentação convencionais. É fato que ainda existe espaço para evolução do revestimento dos rolos, através da busca de materiais que possuam alta resistência ao desgaste e abrasão, sendo ao mesmo tempo viáveis economicamente.

A redução da variação granulométrica do produto da prensa, causada pela descompressão na borda dos rolos, é um campo interessante que pode ser ajustado através do peneiramento do material de progênie das extremidades dos rolos, solução que aparenta ganhar espaço no mercado mineral.

Outro campo atrativo é o aumento de capacidade e tamanho das prensas de rolos, seja através do desenvolvimento de redutores maiores, ou através do desenvolvimento de rolos com dois acionamentos, um de cada lado do rolo.

Morley (2006-b) acredita no desenvolvimento de circuitos compostos por mais de uma etapa de prensagem, que excluam etapas de fragmentação, inclusive a eliminação integral dos moinhos revolventes, onde o produto da prensa possa alimentar diretamente a flotação. Obviamente isso é uma sugestão para estudos futuros, pois a prensa de rolos ainda precisa amadurecer bastante para chegar a este nível.

O fato é que os circuitos convencionais de cominuição advêm de tecnologia amadurecida, ganhos ou melhorias esperados para o futuro são limitados, já a prensa de rolos oferece uma excelente expectativa nos campos operacionais e de manutenção.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AK/ECM, *Comminution Trade-off Study Report IT-2000-G-101*, 2006.

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

CHAVES, P.; PERES, A.; *Teoria é Prática do Tratamento de Minérios*. Brasil, 2003, p.425-489.

DANILKEWICH, H.; HUNTER, I.; *HPGR Challenges And Growth Opportunities.* Vancouver: University Of British Columbia, 2006. p. IV-27 – IV-44.

DELBONI, H.; Centro de Tecnologia Mineral cited [November, 2006]. Available from Internet:<http://www.cetem.gov.br/tendencias/paineis/cominuicao/DELBONI _Homero_COMINUICAO_CENARIOS_TENDENCIAS_PERSPECTIVAS_2006.pdf>

DNER-ME 082/94 – *Solos, Determinação do Limite de Plasticidade*. Métodos de Ensaio, 1994.

DUNNE, R.; *The Journey from Soft to Competent and Abrasive.* Vancouver: University Of British Columbia, 2006. p.190-205.

ECM, Projeto Minas Rio, 2008.

FEIK, H. J.; *HPGR for the Comminution of Ores and Minerals – A Digest of Recent Publications*, private communication, 2003.

GOMES, F., Fonte Particular, 2010.

JKRMC – Julius Kruttschnitt Mineral Reserch Center. *Mineral Comminution Circuits; Their Operation and Optimization*. Australia. 1995. 413p.

KLYMOWSKY, R. – Polysius Reserch Centre. *On an Iron Ore Pre-Concentrate from the XXX-Project.* Alemanha, 2005.

KLYMOWSKY, R.; PATZELT, N.; KNECHT, J.; BURCHARDT, E.; *An Overview Of HPGR Technology.* Vancouver: University Of British Columbia, 2006. p. IV-11 – IV-26.

KLYMOWSKY, R.; PATZELT, N.; KNECHT, J.; BURCHARDT, E.; *HPGR Technology: Present and Future.* Procemin 2008, Chile.

KAWATRA, S. K.; EISELE, T.C.; WALQUI, H. J.; *Optimization of Comminution Circuit Throughput and Product Size Distribution by Simulation and Control.* Michigan Technological University - Department of Chemical Engineering. USA, 2004.

MAXTON, D.; MEER, F.; GRUENDKEN, A.; *KHD Humboldt Wedag – 150 Years of Innovation and New Developments for the KHD Roller Press.* Vancouver: University Of British Columbia, 2005. p. IV-206 – IV-221.

MORLEY, C.; *Flowsheets for HPGR.* Vancouver: University Of British Columbia, 2006-a. p. IV-172 – IV-189.

MORLEY, C.; *High Pressure Grinding Rolls-A Technology Review, in Advances of Comminution*. Edited by Kawatra, S. K., SME, Littleton, CO, USA, 2006-b.

MORRELL, S.: *Evaluation of HPGR/BALL Mill and ABC Circuits for Treatment of Salobo Ore.* SMCC Pty Ltd, 2006.

OLIVEIRA, A.; ODENWALT, B.; GOULART, C.; *High Pressure Grinding Rolls Application in Iron Ore in Brazil*. Proceedings of Randol Innovative Metallurgy Forum, 2005. p.107-112.

PARKER, B.; ROWE, P.; LANE, G.; MORELL, S.; *The Decision to Opt for High Pressure Grinding Rolls for the Boddington Expansion.* Vancouver: University Of British Columbia, 2001. p. III-93 – III-106.

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.

REIS, R., Fonte Particular, 2007.

SILVIO, E., Avaliação da Utilização de Prensa de Rolos para o Projeto Minas Rio, ECM, 2007.

VALADÃO, G.E.S., *Roteiro de Aula,* EEUFMG, 2007.

VANDERBEEK, J. L.; LINDE, T. B.; BRACK, W. S.; MARSDEN, J. O.; *HPGR Implementation At Cerro Verde.* Vancouver: University Of British Columbia, 2006. p. IV-45 – IV-61.

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