



ECO-EFICIÊNCIA DE CIRCUITOS DE COMINUIÇÃO

Fernanda Aucar França

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Rio de Janeiro

Setembro de 2011

ECO-EFICIÊNCIA DE CIRCUITOS DE COMUNICAÇÃO

Fernanda Aucar França

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO.

Examinado por:

Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.

Prof. Rupen Adamian, Dr.

Eng. Rodrigo Magalhães de Carvalho, M.Sc.

Eng. Vladimir Kronemberger Alves, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2011

França, Fernanda

Eco-eficiência de circuitos de comunicação / Fernanda França -
Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2011.

xii, 79 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luis Marcelo Marques Tavares

Projeto de Graduação - UFRJ / Escola Politécnica / Curso de
Engenharia Metalúrgica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 75-79

1. Desenvolvimento Sustentável. 2. Processamento Mineral. 3.
Eficiência Energética.

I. Tavares, Luis Marcelo Marques. II. Universidade Federal do Rio
de Janeiro, UFRJ, Curso de Engenharia Metalúrgica. III. Eco-
eficiência de circuitos de comunicação

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por toda a força encontrada nas horas difíceis.

Ao professor Luís Marcelo. Pela orientação e tempo dedicado, essenciais para a execução deste projeto.

À minha família. Meus pais, meu irmão, minha irmã e meu namorado. Pelo apoio e paciência que tiveram comigo.

Aos amigos, pelos conselhos e por me passarem toda a confiança e tranquilidade, também fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao engenheiro Rodrigo Magalhães de Carvalho pela ajuda com as simulações realizadas.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico.

Eco-eficiência de circuitos de cominuição

Fernanda Aucar França

Setembro de 2011

Orientador: Luís Marcelo M. Tavares

Curso: Engenharia Metalúrgica

O desenvolvimento sustentável tem se tornado uma questão essencial e bastante discutida nos dias atuais. A indústria mineral, apesar da sua importância para a sociedade, representa uma atividade bastante impactante para o meio ambiente. Nesse sentido, algumas ferramentas vêm sendo desenvolvidas para o melhor gerenciamento de projetos, no sentido de evitar perdas, como com água, matéria-prima e energia, e com isso reduzir o impacto ambiental. A cominuição representa a etapa do processamento mineral de maior consumo de energia elétrica e de maiores ineficiências energéticas. Ela é, portanto, o processo mais favorável de se fazer economias significativas de energia. Desta forma, se torna importante poder comparar as alternativas de circuitos de cominuição sob a ótica do desenvolvimento sustentável. Isto é, com base em sua eficiência energética global e na geração de gases de efeito estufa. O presente trabalho visa analisar diferentes métodos de cálculo da eficiência energética de circuitos industriais, aplicando o conceito da eco-eficiência energética, no qual a energia indireta, consumida na fabricação dos revestimentos e corpos moedores dos equipamentos de britagem e moagem e emissão de gases do efeito estufa, é incorporada no cálculo da eficiência energética global. Demonstrando a aplicação do conceito, dois

estudos de caso consistindo de usinas em operação no Brasil são analisados e as suas eficiências calculadas.

Palavras-chave: Desenvolvimento Sustentável, Processamento Mineral, Eficiência Energética.

Sumário

1.	Introdução.....	1
2.	Revisão Bibliográfica.....	3
2.1	Sustentabilidade	3
2.1.1	Histórico	3
2.1.2	Efeito Estufa	9
2.1.3	Créditos de Carbono	10
2.2	Mineração e Desenvolvimento Sustentável	12
2.2.1	Aspectos gerais	12
2.2.2	Impactos Ambientais da Mineração	12
2.2.3	A Produção dos Materiais e o Meio Ambiente	14
2.2.4	SUSOP – SUStainable OPerations	16
2.2.4.1	Processo de Avaliação de Oportunidades	18
2.2.4.2	Desenvolvimento Sustentável e Ciclo de Gestão de Projetos na Indústria Mineral.....	19
2.2.5	Indicadores de Sustentabilidade	20
2.3	Beneficiamento de Minério	22
2.3.1	Cominuição.....	26
2.3.1.1	Britagem.....	26
2.3.1.2	Moagem	31
2.4	Consumo de Energia	34
2.4.1	Aspectos Gerais	34
2.4.2	Eficiência Energética.....	35
2.4.2.1	Método do Índice de Trabalho Operacional de Bond.....	36
2.4.2.2	Método da Eficiência Operacional de Musa e Morrison	37
2.4.2.3	Método de Shi e Kojovic	39
2.4.2.4	Método de Tavares.....	41
2.4.2.5	Método de Avaliação da Eco-eficiência	48
3.	Estudo de Caso	53
3.1	Premissas	53
3.1.1	Caracterização dos Materiais.....	53
3.1.2	Fluxogramas	56
3.1.2.1	Pedra Sul Mineração	56

3.1.2.2	Mina de Sossego	58
3.1.3	Análises Granulométricas da Alimentação e do Produto	60
3.1.3.1	Pedra Sul Mineração	60
3.1.3.2	Mina de Sossego	61
3.1.4	Consumo Energético Específico dos Circuitos Industriais	62
4.	Resultados e Discussão	64
4.1	Consumo Energético Teórico	64
4.2	Eficiência Energética	69
4.3	Eco-eficiência Energética	70
5.	Conclusão	73
6.	Referências Bibliográficas	75

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Ciclos de produção do projeto para o processamento mineral.....	17
Figura 2.2 - Processo de Avaliação de Oportunidades (Corder <i>et al.</i> , 2009).....	19
Figura 2.3 - Fluxograma típico de tratamento de minérios.....	23
Figura 2.4 - Britador de mandíbulas.....	27
Figura 2.5 - Britador cônico.....	29
Figura 2.6 - Britador de rolos de alta pressão (HPGR).....	30
Figura 2.7 - Moinho de bolas.....	32
Figura 2.8 - Moinho semi-autógeno (SAG).....	33
Figura 2.9 - Comparação das eficiências calculadas usando o método de -75 μm e o método de Bond.....	38
Figura 2.10 - Comparação entre a moabilidade de laboratório e a moabilidade em grande escala para diferentes equipamentos de cominuição usando o novo método - 75 μm (A) e o método de Bond (B).....	39
Figura 2.11 - Cominuição em múltiplos estágios com a quebra de partículas individuais em intervalos granulométricos estreitos (Tavares, 2004).....	42
Figura 2.12 - Variação da energia específica de fratura média (E_{50j}) com o tamanho de partícula para os materiais estudados.....	44
Figura 2.13 - Relação entre o número total de impactos necessários para a quebra de partículas individuais e a energia relativa de impacto.....	46
Figura 2.14 - Efeito da energia relativa de impacto na energia total consumida para obter um produto 100 % passante em 0,3 mm a partir de uma alimentação dada por $P_i^{(0)} = (D_i/8)^{0,4}$	47
Figura 2.15 - Circuito típico de cominuição mostrando a entrada de energia direta, a entrada de energia indireta e as emissões de gases do efeito estufa (Musa e Morrison 2008).....	50
Figura 2.16 - Energia direta e indireta consumida no circuito de cominuição em Kumtor.....	51

Figura 2.17 - GEE gerados a partir da energia total direta e indireta consumida no circuito de moagem de Kumtor.....	51
Figura 3.1 - Energias de fratura médias (E_{m50}) medidas (símbolo preenchido) e estimadas (símbolo vazio) em função do tamanho de partícula para os minérios estudados.....	54
Figura 3.2 - Fluxograma do circuito da Pedra Sul Mineração (Neves, 2002).....	57
Figura 3.3 - Fluxograma da usina de Sossego (Bergerman <i>et al</i> , 2009).....	59
Figura 3.4 – Distribuição Granulométrica do Produto e da Alimentação do Circuito da Pedra Sul Mineração.....	61
Figura 3.5 – Distribuição Granulométrica do Produto e da Alimentação do Circuito da Mina de Sossego.....	62
Figura 4.1 - Efeito da energia relativa de impacto na energia total consumida no Circuito Pedra Sul Mineração.....	64
Figura 4.2 - Efeito da energia relativa de impacto na energia total consumida no Circuito Mina de Sossego.....	65
Figura 4.3 – Evolução da granulometria do Circuito Pedra Sul Mineração para $E^* = 2,1$	66
Figura 4.4 – Evolução da granulometria do Circuito Mina de Sossego para $E^* = 2,1$	66
Figura 4.5 – Distribuição granulométrica da alimentação, do produto medido e do produto simulado do Circuito Pedra Sul Mineração para $E^* = 2,1$	67
Figura 4.6 – Distribuição granulométrica da alimentação, do produto medido e do produto simulado do Circuito Mina de Sossego para $E^* = 2,1$	68
Figura 4.7 – Energia acumulada por ciclos do Circuito Pedra Sul Mineração para $E^* = 2,1$	68
Figura 4.8 – Energia acumulada por ciclos do Circuito Mina de Sossego para $E^* = 2,1$	69

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa (GEE).....	11
Tabela 2.2 – Energia Utilizada em Cada Etapa de Produção (Barreto, 2001).....	15
Tabela 2.3 – Eficiências energéticas da etapa de processamento de alguns metais selecionados (Barreto, 2001).....	16
Tabela 2.4 - Indicadores de Sustentabilidade da Indústria Mineral.....	21
Tabela 2.5 – Consumo de energia do circuito completo de cominuição (Rosario e Hall, 2008).....	35
Tabela 2.6 - Eficiência energética de moinhos de bolas calculada pelo novo método....	40
Tabela 2.7 - Eficiência energética de moinhos SAG calculada pelo método de Shi e Kojovic.....	41
Tabela 2.8 - Avaliação da eco-eficiência do circuito de cominuição de Kumtor.....	52
Tabela 3.1 – Parâmetros do circuito da Pedra Sul Mineração e da Mina de Sossego (Barrios <i>et al.</i> , 2011)	55
Tabela 3.2 – Classificação dos valores de <i>Work Index</i> (Napier-Munn <i>et. al.</i> , 1999).....	55
Tabela 3.3 – Classificação da Abrasividade segundo o parâmetro <i>Ai</i> (Tavares, 2009)..	56
Tabela 3.4 - Fórmulas para determinação da taxa de desgaste em função do índice de abrasão (g/kWh) (Chaves e Peres, 2003).....	56
Tabela 3.5 – Dados dos equipamentos do circuito da Pedra Sul Mineração.....	58
Tabela 3.6 – Dados dos equipamentos do circuito da Mina de Sossego.....	60
Tabela 3.7 – Consumo energético específico do Circuito Pedra Sul Mineração.....	62
Tabela 3.8 – Consumo energético específico do Circuito Mina de Sossego.....	63
Tabela 3.9 - Consumo energético específico, A80 e P80 dos circuitos.....	63
Tabela 4.1 – Eficiência energética pelo método de Bond dos circuitos.....	69
Tabela 4.2 – Eficiência energética pelo método de Tavares dos circuitos.....	70
Tabela 4.3 – Consumo energético indireto do circuito da Pedra Sul Mineração.....	71
Tabela 4.4 – Consumo energético indireto do circuito da Mina de Sossego.....	71

Tabela 4.5 – Eco-eficiência energética dos circuitos.....	71
---	----

1. Introdução

Há algumas décadas se pensava que o meio ambiente era uma fonte inesgotável, e que toda ação de aproveitamento da natureza fosse infinita. No entanto, desastres naturais decorrentes deste pensamento foram surgindo e em função disso a ONU retomou, no início da década de 1980, o debate das questões ambientais. O documento final dos estudos, conhecido como “Nosso Futuro Comum” ou Relatório Brundtland, propõe o desenvolvimento sustentável, definido como “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem às suas necessidades”.

Nos últimos anos, esta expressão tem se tornado cada vez mais frequente em debates e discussões acerca do atual padrão de vida das sociedades e junto com ela questões relacionadas à eficiência energética, emissões de gases do efeito estufa e créditos de carbono.

A indústria mineral representa atualmente um dos setores mais importantes da economia do país. Esta atividade contribui de forma decisiva para o bem estar e melhoria da qualidade de vida das presentes e futuras gerações. No entanto, dela decorrem impactos ambientais e sociais negativos, que podem ser minimizados, se a atividade for planejada e executada dentro do conceito da sustentabilidade (Meadows *et al.*, 1972).

Com o intuito de incorporar princípios do desenvolvimento sustentável na concepção e execução dos projetos de mineração um novo programa intitulado SUSOP (*SUSustainable OPerations*) está sendo desenvolvido pelo CSRP - Centre for Sustainable Resource Processing da University of Queensland. O plano é desenvolver o SUSOP através de um aplicativo interativo para estudos de caso e com isso atender as necessidades de gerenciamento de projetos industriais.

Outra ferramenta importante para determinar se uma atividade é ou não sustentável, são os indicadores de sustentabilidade. Estes indicadores são utilizados para medir os impactos da atividade do homem na natureza, permitindo, desta forma, determinar o desempenho obtido no cumprimento de metas e fazer comparações com parâmetros relativos a outras épocas e/ou locais. Na indústria mineral, tais indicadores devem focalizar todo o processo de suprimento mineral, envolvendo as atividades de

exploração, desenvolvimento, extração, transporte, transformação e utilização do bem mineral.

A primeira etapa do tratamento de minérios consiste na cominuição, que por sua vez é dividida nas operações de britagem e moagem. A baixa eficiência da cominuição aliada ao fato de ser a responsável pela maior parte do consumo de energia do processamento mineral, fazem com que importantes economias ainda possam ser atingidas através da otimização deste processo.

Hoje em dia a indústria mineral vem priorizando a busca por processos produtivos energeticamente mais eficientes. No caso do projeto de novas instalações, o consumo específico de energia da cominuição já é um dos fatores mais importantes na escolha dos equipamentos e da configuração do circuito a ser adotado. A escolha do melhor circuito pode fazer com que reduções de aproximadamente 20% no consumo de energia sejam atingidas (Rosário e Hall, 2008).

É também importante levar em conta não somente a energia diretamente empregada nos equipamentos de britagem e moagem, manuseio e separação, mas também a energia necessária para a fabricação dos consumíveis e emissões de gases do efeito estufa, na escolha das tecnologias a serem adotadas no futuro em usinas de cominuição. Atualmente, entretanto, faltam informações suficientemente precisas que permitam estimar essa eficiência energética global, bem como avaliar as emissões de CO₂ associadas à produção dos revestimentos e corpos moedores empregados em britadores e moinhos (Tavares, 2008).

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo analisar alguns dos métodos empregados no cálculo da eficiência energética, incluindo o cálculo do consumo energético ótimo, através da quebra de partículas individuais, desenvolvido por Tavares (Tavares, 2004); introduzir o conceito da eco-eficiência energética, que incorpora o consumo de energia indireta à eficiência energética dos circuitos de cominuição e a aplicação desses conceitos à prática, através da análise de dois estudos de caso de circuitos industriais. Esse conjunto de fatores irá auxiliar na tomada de decisão do circuito de cominuição mais sustentável.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Sustentabilidade

2.1.1 Histórico

Em 1968 o industrial italiano Aurelio Peccei e o cientista escocês Alexander King fundaram o chamado Clube de Roma. Trata-se de um grupo de pessoas ilustres que se reuniam para debater um vasto conjunto de assuntos relacionados à política, economia internacional e, sobretudo, ao meio ambiente.

De acordo com Meadows *et al.* (1972), o Clube de Roma tornou-se muito conhecido a partir de 1972, ano da publicação do relatório intitulado “Os Limites do Crescimento”, elaborado por uma equipe do Massachusetts Institute of Technology (MIT), contratada pelo Clube de Roma e chefiada por Dana Meadows. O relatório, que ficaria conhecido como Relatório do Clube de Roma ou Relatório Meadows, tratava de problemas cruciais para o futuro desenvolvimento da humanidade; tais como energia, poluição, saneamento, saúde, ambiente, tecnologia e crescimento populacional.

A equipe do MIT havia chegado à conclusão, utilizando modelos matemáticos, de que o Planeta Terra não suportaria o crescimento populacional em curso devido à pressão gerada sobre os recursos naturais e energéticos e ao aumento da poluição, mesmo levando em conta o avanço tecnológico (Corazza, 2005). Embora as suas previsões não tenham sido confirmadas devido a vários fatores, como a própria descoberta de novos depósitos minerais, ele representou um importante marco para despertar a atenção para a importância dos riscos associados ao crescimento econômico das nações.

Naquela época pensava-se que o meio ambiente era uma fonte inesgotável, e que toda ação de aproveitamento da natureza fosse infinita. Para tanto, problemas foram surgindo, como secagem de lagos e rios, o efeito da inversão térmica e as ilhas de calor.

Tendo em vista esses problemas, a ONU decidiu inaugurar a Primeira Conferência Mundial sobre o Homem e o Meio Ambiente. Realizada em 1972 em Estocolmo, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano foi a primeira grande reunião internacional para discutir as atividades humanas em relação ao meio ambiente.

A Conferência de Estocolmo lançou as bases das ações ambientais em nível internacional, chamando a atenção especialmente para questões relacionadas com a

degradação ambiental e a poluição. Na capital da Suécia a sociedade científica já detectava graves problemas causados pela poluição atmosférica provocada pelas indústrias.

Nessa conferência se tornou clara a contraposição entre grupos, como aquele representado pelo MIT, que chegavam a propor a limitação das atividades da indústria no mundo, tendo em vista que essa é a atividade mais poluidora (Dias, 1993), e aqueles que defendiam a liberdade dos países subdesenvolvidos de buscar o seu desenvolvimento através da industrialização.

A Declaração de Estocolmo, que se traduziu em um Plano de Ação, define princípios de preservação e melhoria do ambiente natural, destacando a necessidade de apoio financeiro e assistência técnica a comunidades e países mais pobres. Embora a expressão "desenvolvimento sustentável" ainda não fosse usada, a declaração já abordava a necessidade imperativa de "defender e melhorar o ambiente humano para as atuais e futuras gerações" - um objetivo a ser alcançado juntamente com a paz e o desenvolvimento econômico e social.

Já no início da década de 1980 a ONU retomou o debate das questões ambientais. Indicada pela entidade, a primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland, chefiou a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento para estudar o assunto. O documento final desses estudos chamou-se "Nosso Futuro Comum", também conhecido como Relatório Brundtland. Apresentado em 1987, propõe o desenvolvimento sustentável, definido como "aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem às suas necessidades".

O Relatório faz parte de uma série de iniciativas as quais reafirmam uma visão crítica do modelo de desenvolvimento adotado pelos países industrializados e reproduzido pelas nações em desenvolvimento, e ressaltam os riscos do uso excessivo dos recursos naturais, sem considerar a capacidade de suporte dos ecossistemas. O relatório aponta ainda para a incompatibilidade entre desenvolvimento sustentável e os padrões de produção e consumo vigentes.

Fica muito claro, nessa nova visão das relações homem-meio ambiente, que não existe apenas um limite mínimo para o bem-estar da sociedade; há também um limite máximo para a utilização dos recursos naturais, de modo que sejam preservados.

Segundo o Relatório da Comissão Brundtland, uma série de medidas deve ser tomada pelos países para promover o desenvolvimento sustentável. Entre elas:

- Limitação do crescimento populacional;
- Preservação da biodiversidade e dos ecossistemas;
- Diminuição do consumo de energia e desenvolvimento de tecnologias com uso de fontes energéticas renováveis;
- Aumento da produção industrial nos países não industrializados com base em tecnologias ecologicamente adaptadas;
- Controle da urbanização desordenada e integração entre campo e cidades menores;

Em âmbito internacional, as metas propostas são:

- Adoção da estratégia de desenvolvimento sustentável pelas organizações de desenvolvimento – órgãos e instituições internacionais de financiamento;
- Proteção dos ecossistemas supranacionais como a Antártida e os oceanos, pela comunidade internacional;
- Implantação de um programa de desenvolvimento sustentável pela Organização das Nações Unidas – ONU.

Recomendou-se que o conceito de desenvolvimento sustentável deveria ser assimilado pelas lideranças de empresas como uma nova forma de produzir sem degradar o meio ambiente, estendendo essa cultura a todos os níveis da organização, para que seja formalizado um processo de identificação do impacto da produção das empresas no meio ambiente e resulte na execução de um projeto que alie produção e preservação ambiental com uso de tecnologia adaptada a esse preceito.

Algumas medidas para a implantação de um programa minimamente adequado de desenvolvimento sustentável são:

- Uso de novos materiais na construção;
- Aproveitamento e consumo de fontes alternativas de energia, como a solar, a eólica e a geotérmica;
- Reciclagem de materiais;
- Consumo racional de água e de alimentos;
- Redução do uso de produtos químicos prejudiciais à saúde na produção de alimentos.

Nesse sentido, em 1992 representantes de quase todos os países do mundo reuniram-se, no Rio de Janeiro, para decidir quais as medidas que deveriam ser tomadas para diminuir a degradação ambiental e garantir a existência de outras gerações. A intenção, nesse encontro, era introduzir a idéia do desenvolvimento sustentável, um modelo de crescimento econômico menos consumista e mais adequado ao equilíbrio ecológico. A diferença entre 1992 e 1972 pode ser traduzida pela presença maciça de Chefes de Estado, fator indicativo da importância atribuída à questão ambiental no início da década de 1990.

A Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento - ECO-92 consolidou o conceito de desenvolvimento sustentável. A mais importante conquista da Conferência foi colocar esses dois termos, meio ambiente e desenvolvimento, juntos - concretizando a possibilidade apenas esboçada na Conferência de Estocolmo, em 1972, e consagrando o uso do conceito de desenvolvimento sustentável, defendido em 1987 pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento através do Relatório de Brundtland. Este conceito foi concebido de modo a conciliar as reivindicações dos defensores do desenvolvimento econômico com as preocupações de setores interessados na conservação dos ecossistemas e da biodiversidade (UNCED, 1992).

O encontro contribuiu também para a mais ampla conscientização de que os danos ao meio ambiente eram majoritariamente de responsabilidade dos países desenvolvidos e com isso a aceitação por eles de princípios como o das responsabilidades comuns, mas diferenciadas.

Outra importante conquista da Conferência foi a Agenda 21, um amplo e abrangente programa de ação que concilia métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica (UNCED, 1992). Um importante ponto, segundo este estudo, é o planejamento de sistemas de produção e consumo sustentáveis contra a cultura do desperdício.

Em 1997, em Nova Iorque foi realizada a 19ª Sessão Especial da Assembleia-Geral das Nações Unidas, chamada de Rio+5. Com o objetivo de avaliar os cinco primeiros anos de implementação da Agenda 21, o encontro identificou as principais dificuldades relacionadas à implementação do documento, priorizou a ação para os anos seguintes e conferiu impulso político às negociações ambientais em curso.

Em 2002 a ONU realizou a Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, a chamada Rio+10 ou conferência de Joanesburgo. O encontro reafirmou os compromissos da Agenda 21, propondo a maior integração entre as dimensões econômica, social e ambiental (United Nations, 2002).

Em 1997 houve o estabelecimento do Protocolo de Quioto. Discutido e negociado em Quioto no Japão tinha como objetivo diminuir os impactos causados pelos gases do efeito estufa. Diferentemente da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, estabelecida a partir da Eco-92 e da Agenda-21, o Protocolo estabeleceu normas mais claras sobre a redução de emissões de gases poluentes, com destaque para o CO₂, e metas a serem atingidas por países que emitiram mais gases no passado. Nele se propõe um calendário pelo qual os países-membros, principalmente os desenvolvidos, têm a obrigação de reduzir, no período de 2008 a 2012, a emissão de gases de efeito estufa em pelo menos 5,2 % em relação aos níveis de 1990. As metas de redução não são homogêneas a todos os países, colocando níveis diferenciados para os 38 países que mais emitem gases de efeito estufa. Países como Brasil, México, Argentina e Índia não receberam metas de redução.

O Protocolo de Quioto determinou seis gases cujas emissões deveriam ser reduzidas:

- CO₂ – Dióxido de Carbono
- NO₂ – Óxido nitroso
- CH₄ – Metano
- HFCs – Hidrofluorcarbonetos
- PFCs – Perfluorcarbonetos
- SF₆ – Hexafluoreto de enxofre

O Protocolo também estimulou os países signatários a cooperarem entre si, através de algumas ações básicas como:

- Reformar os setores de energia e transportes;
- Promover o uso de fontes energéticas renováveis;
- Limitar as emissões de metano no gerenciamento de resíduos e dos sistemas energéticos;
- Proteger florestas e outros sumidouros de carbono.

O Protocolo foi aberto para assinaturas e ratificado em 1999. Para entrar em vigor precisou que 55% dos países que, juntos, produzem 55% das emissões, o ratificassem. Assim, somente entrou em vigor em 2005, depois que a Rússia o ratificou em 2004.

A ratificação do Protocolo de Quioto pelos países do mundo esbarrou na necessidade de mudanças na sua matriz energética. Os elevados custos de sua implantação recairiam, principalmente, sobre os países desenvolvidos, em especial os Estados Unidos da América, que se negaram a ratificar o Protocolo. Um dos fatores alegados foi a inexistência de metas obrigatórias de redução das emissões de gás carbônico para os países em desenvolvimento.

Apesar de não serem obrigados a cumprir metas de redução, os países em desenvolvimento já respondiam por quase 52% das emissões de CO₂ mundiais e por 73% do aumento das emissões em 2004 (Wikipedia, 2011). Frente ao rápido crescimento econômico de economias emergentes, cuja matriz energética é fortemente dependente da queima de combustíveis fósseis, em especial do carvão mineral, o aumento nas emissões de gás carbônico parece inevitável para as próximas décadas, frustrando possivelmente as pretensões do Protocolo de Quioto.

Se o Protocolo for implementado com sucesso, estima-se que a temperatura global se reduza entre 1,4°C e 5,8 °C até 2100. Entretanto, isto dependerá muito das negociações pós o período 2008/2012, pois há comunidades científicas que afirmam categoricamente que a meta de redução de 5% em relação aos níveis de 1990 é insuficiente para a mitigação do aquecimento global.

O protocolo de Quioto expirará em 2012, e já há o compromisso da ONU e de alguns governos para o delineamento de um novo acordo ou o que é mais provável, de uma emenda no Protocolo, que estabeleceria novas metas a serem cumpridas após 2012. As discussões começaram em 2007 em Washington, onde os chefes de estado de Canadá, França, Alemanha, Itália, Japão, Rússia, Reino Unido, Estados Unidos, Brasil, China, Índia, México e África do Sul concordaram em princípio sobre o esboço de um sucessor para o Protocolo de Quioto. Eles discutiram, em especial, a criação de um limite máximo para o comércio dos créditos de carbono, bem como a aplicação de metas de redução das emissões de CO₂ aos países em desenvolvimento.

Uma característica chave das conversações foi um relatório das Nações Unidas que mostrou como a eficiência energética poderia trazer significativas reduções nas emissões, a baixo custo.

A sustentabilidade industrial tem sido foco das discussões sobre a temática que envolve questões não apenas ambientais, mas que também visam o crescente lucro, ou de condições favoráveis às indústrias. Uma das questões centrais em torno do desenvolvimento sustentável das indústrias é como torná-las ecologicamente éticas e ao mesmo tempo produtivas. Pode parecer um conceito difícil de ser implementado e, em muitos casos, economicamente inviável. No entanto, mesmo nas atividades humanas altamente impactantes ao meio ambiente, como a mineração, extração vegetal, agricultura em larga escala, fabricação de papel e celulose e outras, a aplicação de práticas sustentáveis revelou-se economicamente viável e em muitos deles houve inclusive a diminuição dos custos.

A adoção da sustentabilidade industrial vem ganhando um espaço cada vez maior na questão da aceitabilidade dos consumidores que estão cada vez mais conscientes das questões ambientais (Abreu, 2010a) Portanto, empresas que queiram manter a competitividade a longo prazo devem trazer o conceito de sustentabilidade da teoria para a prática.

2.1.2 Efeito Estufa

O Efeito Estufa é a reação que a Terra tem para manter sua temperatura constante. É um fenômeno ocasionado pela concentração de gases na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono (CO₂), que agem como isolantes por absorver uma parte da energia irradiada pela Terra. As moléculas desses gases, conhecidos como gases do efeito estufa, agora mais ricos em energia, reirradiam-na em todas as direções na forma de raios infravermelhos. Uma parte retorna para a Terra, mantendo uma situação de equilíbrio térmico sobre o planeta, tanto durante o dia como durante a noite. Na ausência desta ação isolante, a Terra iria sofrer um resfriamento excessivo. Sem o carbono na atmosfera, por exemplo, seria coberta de gelo. De acordo com a GreenCo., a superfície terrestre é aproximadamente 33°C mais quente do que ela seria sem o efeito estufa.

A atmosfera é constituída de vários gases. Os principais são o Nitrogênio – N₂ e o Oxigênio – O₂ que, juntos, compõem cerca de 99 % da atmosfera. Alguns outros gases encontram-se presentes em pequenas quantidades, incluindo os gases do efeito estufa – GEE. Dentre estes gases estão o dióxido de carbono – CO₂, o metano – CH₄, o óxido nitroso – N₂O, os clorofluorcarbonos – CFCs, os Perfluorcarbonetos – PFC's e também o vapor de água.

Ao longo dos últimos cem anos, a concentração de gases de efeito estufa, principalmente CO₂, CH₄ e N₂O, vem aumentando, como resultado da maior atividade industrial, agrícola e de transporte, e principalmente devido à queima de combustíveis fósseis e ao desmatamento. A derrubada de árvores provoca o aumento da quantidade de dióxido de carbono na atmosfera devido à queima e à decomposição natural.

Dois processos naturais absorvem 95% do CO₂ emitido, cada um contribuindo igualmente. Um deles é a fotossíntese e o outro é a absorção de CO₂ pelos oceanos devido à reação deste gás com íons cálcio e magnésio e consequente formação de depósitos calcários no fundo dos mares. Com esses dois processos, resta uma quantidade percentualmente pequena (5%) de todo o gás carbônico emitido sem ser reciclado, mas grande o suficiente para que ocorra o aumento da temperatura média do planeta.

2.1.3 Créditos de Carbono

Com o intuito de reduzir os efeitos lesivos ao ambiente, que ocorrem devido à emissão de gases do efeito estufa, houve um consenso internacional que viabiliza amenizar essas emissões, sem que com isso prejudique a economia nacional de nenhum país envolvido. Foi criada então a “moeda” chamada crédito de carbono.

Créditos de carbono ou Redução Certificada de Emissões são certificados emitidos para um agente que reduziu a sua emissão de gases do efeito estufa. São espécies de moedas, com valor cotado em dólares, dadas aos setores industriais que, de fato, tenham reduzido a emissão dos gases poluentes, haja vista a meta que foi estipulada por cada nação aos seus setores mais poluentes. De forma efetiva, essas moedas podem ser negociadas no mercado, propiciando assim, uma gestão global e um controle financeiro sobre a questão ambiental.

A ideia dos créditos de carbono nasceu durante o Protocolo de Quioto que postulou as metas para as nações signatárias. Assim, aqueles países ou indústrias que não conseguem atingir as metas de reduções de emissões, tornam-se compradores de créditos de carbono. Por outro lado, aquelas indústrias que conseguiram diminuir suas emissões abaixo das cotas determinadas, podem vender o que deixaram de emitir.

Por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono corresponde a um crédito de carbono. A redução da emissão de outros gases, igualmente geradores do efeito estufa, também pode ser convertida em créditos de carbono, utilizando-se o conceito de Carbono Equivalente. O Carbono equivalente é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas de gases do efeito estufa pelo seu potencial de aquecimento global (Signorini, 2007). O potencial de aquecimento global do CO₂ foi estipulado como 1. A Tabela 2.1 mostra o potencial de aquecimento global correspondente para os outros gases do efeito estufa em relação ao CO₂.

Tabela 2.1 - Potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa (GEE) (Signorini, 2007)

Gases do Efeito Estufa	Potencial de Aquecimento Global
CO ₂ - Dióxido de Carbono	1
CH ₄ - Metano	23
N ₂ O - Óxido nitroso	298
HFCs - Hidrofluorcarbonetos	140 - 11.700
PFCs - Perfluorcarbonetos	6.500 – 8.700
SF ₆ - Hexafluoreto de enxofre	23.900

Como se pode observar na Tabela 2.1, o potencial de aquecimento global do gás metano, por exemplo, é 23 vezes maior do que o potencial do CO₂, portanto o CO₂ equivalente do metano é 23. Isto quer dizer que uma tonelada de metano corresponde a 23 créditos de carbono. Desta forma, no mercado de créditos de carbono, uma indústria de um país em desenvolvimento pode tanto comercializar com outras do mesmo país, ou mesmo vender seus créditos ao mercado internacional, que necessita com mais frequência desse tipo de crédito.

Comprar créditos de carbono no mercado corresponde aproximadamente a comprar uma permissão para emitir gases do efeito estufa. O preço dessa permissão

deve ser necessariamente inferior ao da multa que o emissor deveria pagar ao poder público. Para o emissor, portanto, comprar créditos de carbono no mercado significa, na prática, obter um desconto sobre a multa devida.

Esse é um setor muito novo no mercado financeiro, sendo, portanto, suscetível a falhas, remodelações, riscos e críticas. Entretanto tais medidas tornam mais viáveis uma reeducação no pensamento financeiro e econômico sobre as questões ambientais e industriais (Abreu, 2010b).

2.2 Mineração e Desenvolvimento Sustentável

2.2.1 Aspectos gerais

Os minerais constituem os insumos básicos mais requisitados pela civilização moderna. A mineração abrange os processos, atividades e indústrias cujo objetivo é a extração de substâncias minerais a partir de depósitos minerais. Podem incluir-se aqui a extração de petróleo e gás natural e até de água. Importante na obtenção de matérias-primas que são utilizadas por indústrias metalúrgicas, siderúrgicas, de fertilizantes e petroquímicas, esta atividade é responsável pela interiorização da indústria e também pela criação de inúmeros empregos diretos. É um setor, portanto, de profunda importância, pois, além do que já representa para a economia nacional, o subsolo brasileiro é um importante depósito mineral. Entre as substâncias encontradas, destacam-se o minério de cobre, minério de nióbio, caulim, grafite, minério de ferro, bauxita, magnesita, entre outras (Farias, 2002).

A capacidade desta atividade em fornecer à sociedade os materiais que esta necessita não é infinita, já que os recursos minerais explorados são bens não renováveis. A imagem um tanto negativa desta atividade junto da sociedade em geral, sobretudo nas últimas décadas, deve-se aos profundos impactos que ela pode ter no ambiente e que têm sido a causa de diversos acidentes ao longo dos tempos.

2.2.2 Impactos Ambientais da Mineração

A resolução do CONAMA 01, de 1986, considera impacto ambiental “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou

indiretamente, afetem a saúde, a segurança e o bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a fauna e a flora; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais”.

De acordo com Calaes (2006), os impactos podem ser caracterizados como:

- Degradação do solo: remoção da cobertura vegetal, mudanças topográficas, mudanças no modelo de drenagem, instabilidade de taludes, erosão acelerada e perdas de capa de solo com prejuízos à produtividade agrícola.
- Contaminação de águas: exaustão de mananciais, alterações de regime hidrológico, efeitos do desflorestamento e contaminação de mananciais.
- Contaminação do ar: emissões gasosas ou de material particulado, oriundo das atividades de extração, beneficiamento ou transporte, com impactos relacionados a moléstias respiratórias, enfermidades oftalmológicas, queda da produtividade agrícola e de fertilidade animal e redução da visibilidade.
- Outros impactos: ruído e vibração; reassentamentos humanos e da vida animal.

Dentre os atuais desafios tecnológicos da indústria extrativa mineral alguns pontos devem ser destacados (Barreto, 2002):

- A lavra é a responsável pela erosão, drenagem ácida, disposição de rejeitos e pela grande movimentação de material numa atividade extrativa. Novos métodos de lavra são necessários para maximizar a produção mineral e minimizar problemas ambientais e sociais, quando do encerramento das atividades;
- O processamento envolvendo as operações químicas e metalúrgicas é o grande responsável pelas perdas energéticas da indústria, efluentes ácidos, metais pesados, disposição de sólidos e geração de gases;
- A manufatura do bem final ainda representa perdas importantes no contexto da sua massa total, indicando relativamente pouca reciclagem, à exceção do alumínio e do aço.

O conceito de Ecologia Industrial identifica e propõe novos arranjos para os fluxos de energia e materiais em sistemas industriais; busca também a integração das atividades econômicas e a redução da degradação ambiental. A Ecologia Industrial reúne conceitos já existentes, como Prevenção da Poluição e Produção Mais Limpa, e reorganiza as atividades industriais sem restringir ao setor industrial propriamente dito.

De modo geral, adota princípios de fechamento do ciclo de materiais e desmaterialização crescente da economia (da Costa, 2002).

Pode-se constatar que a inovação tecnológica, visando ao maior aproveitamento dos recursos minerais, consegue minimizar o impacto ambiental. Como exemplo pode-se citar a diminuição da quantidade e melhoria da qualidade de rejeitos e sua inserção na matriz produtiva.

Pimiento (2000) assinala que a boa gestão dos efeitos sociais e ambientais exige identificar as interações de cada projeto com o seu entorno e assim estabelecer um conjunto integrado de indicadores biofísicos, econômicos e sociais.

Nesse sentido, existem diversos instrumentos utilizados para minimizar impactos ambientais, tais como os legais (licenciamento ambiental, estudo e relatório de impacto ambiental, plano de controle ambiental, recuperação de áreas degradadas), os econômicos (incentivos, caução ambiental) e os técnicos (desenvolvimento de novas tecnologias e parâmetros ambientais).

Pimiento (2000) registra também que as empresas mineradoras estão sendo submetidas a fortes pressões para que adotem as boas práticas ambientais e enfrentem, com êxito, os novos e importantes desafios que se impõem ao aproveitamento dos depósitos minerais, cada vez mais complexos (mais profundos, de menores teores e mais distantes de mercado).

2.2.3 A Produção dos Materiais e o Meio Ambiente

Qualquer material, sendo resultado de um processo de produção, possui no seu ciclo de transformação - extração, processamento, fabricação e manufatura - pelo menos um estágio no qual efluentes, quer sejam sólidos, líquidos ou gasosos, são expelidos ao meio ambiente (Barreto, 2001).

De acordo com Barreto (2001), em um processo produtivo pode-se identificar quatro etapas:

- **Extração:** envolve a lavra e o beneficiamento do minério, resultando como produto o concentrado comercial; nessa etapa, as perdas dependem do método de mineração empregado e das técnicas de beneficiamento. Os efluentes gerados são CO_x e NO_x, águas de processo a partir das máquinas e equipamentos,

lençóis freáticos contaminados, material particulado e movimentação de solo e terra.

- **Processamento:** envolve as operações metalúrgicas e/ou químicas na conversão do concentrado em metal ou composto; as perdas dependem da tecnologia utilizada e disponível, dentre elas, piro, hidro e/ou eletrometalurgia; os efluentes são gases, COx, NOx, SOx, bem como metais pesados, geralmente na forma catiônica, contidos nas águas de processamento e sólidos tais como sedimentos e poeiras de metais pesados.
- **Fabricação:** envolve as operações destinadas à fabricação de barras, chapas e etc.; as perdas, nesse caso, são recirculadas *ad infinitum*, sem perdas efetivas do material; os efluentes são águas e gases industriais.
- **Manufatura:** envolve a aplicação de operações mecânicas para conformação dos metais, tais como estamparia e forja; as perdas são as partes do metal que não foram utilizadas no produto desejado, sendo a reciclagem bem organizada e eficiente em alguns casos, mas não total; os efluentes são vapores de água e gases industriais.

Durante o processo produtivo dos materiais, importantes alterações no meio ambiente são produzidas, pois os mesmos requerem energia para serem processados, como é mostrado na Tabela 2.2, terras para a instalação das fábricas, áreas de recebimento de dejetos, água e movimentação de terra, além de expelirem gases e poeiras (Barreto, 2001).

Tabela 2.2 – Energia Utilizada em Cada Etapa de Produção (Barreto, 2001)

Etapas de Produção	Energia (MWh (Térmico)/t*)
Extração	< 17,5
Processamento	< 113,0
Fabricação	< 6,0
Manufatura	<< 6,0

* Dados não são médias, mas valores máximos, para uma classe selecionada de metais (Al, Cu, Zn, Mg e Ti)

Assim, um dos pontos extremamente importantes é buscar processos que minimizem a quantidade de energia consumida. Nesse sentido, as eficiências

energéticas totais na etapa de processamento representam indicações de onde é importante buscar reduções de consumo de energia. A Tabela 2.3 lista tais eficiências, para metais selecionados (Barreto, 2001).

Tabela 2.3 – Eficiências energéticas da etapa de processamento de alguns metais selecionados (Barreto, 2001)

Metais Primários	Eficiências Energéticas (%)
Al	13,0
Cu	1,4
Zn	5,5
Mg	6,1
Ti	4,1

Os materiais reciclados demandam, como regra geral, menos capital e energia, porém mais mão de obra na sua obtenção do que os empregados na extração primária. Com isso, geralmente exigem menores custos no controle da poluição (Barreto, 2001).

2.2.4 SUSOP – SUSTainable OPerations

Segundo Corder *et al.* (2009), uma revisão da literatura em sustentabilidade, com foco em operações minerais, indica que não existe ainda uma abordagem coerente e integrada para incorporar princípios do desenvolvimento sustentável na concepção e execução dos projetos de mineração. Com isso, uma nova pesquisa está sendo desenvolvida pelo CSRP - *Centre for Sustainable Resource Processing* da *University of Queensland* com a participação da indústria, com o objetivo de criar um método útil e prático de incorporar tais princípios em todas as fases do ciclo de produção. Este método é ilustrado esquematicamente na Figura 2.1.

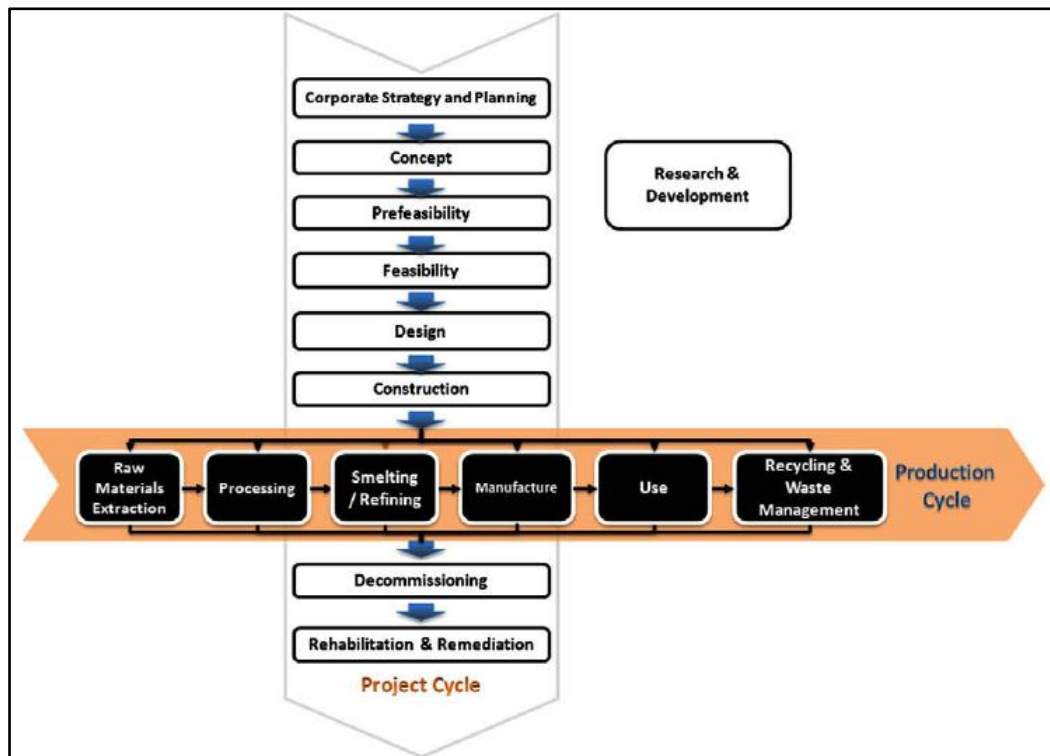


Figura 2.1 - Ciclos de produção do projeto para o processamento mineral (Corder et al. 2009)

Nesse sentido, de acordo com Corder *et al.* (2009), existem diversos elementos essenciais como:

- Um projeto integrado e consistente de ampla estrutura operacional para se pensar em sustentabilidade;
- Definição inicial do projeto em termos de sustentabilidade, dando importância ao contexto local;
- Geração de alternativas que incorporem os objetivos de sustentabilidade;
- Avaliação de alternativas para comparar os resultados do desenvolvimento sustentável complementadas com a de tomada de decisão;
- Envolvimento das partes interessadas na priorização de metas de sustentabilidade e,
- Visão holística do ciclo de vida com foco nas interações do sistema.

A importância da sustentabilidade na indústria mineral se encontra atualmente em um nível semelhante à questão da segurança no passado. Esta analogia pode ser estendida para o SUSOP e seu desenvolvimento comparado ao HAZOP (*Hazard and Operability Studies*), um método detalhado para a análise sistemática de perigo previsto

ou existente de uma operação. O HAZOP trouxe um método rigoroso e amplamente adotado para a integração da segurança ao projeto, enquanto o SUSOP pretende fazer o mesmo para a sustentabilidade. O plano é desenvolver o SUSOP através de um aplicativo interativo para estudos de caso, com a abordagem a ser aperfeiçoada e desenvolvida para atender as necessidades de gerenciamento de projetos industriais. Seu objetivo é fornecer um mecanismo abrangente e rigoroso para:

- Gerar projetos viáveis com os princípios de operação de acordo com o desenvolvimento sustentável;
- Avaliar os benefícios da sustentabilidade e os resultados destas ações;
- Avaliar cada ação usando como base o desenvolvimento sustentável na tomada de decisão;
- Apoiar a engenharia, o gerenciamento e posteriormente a operação dos projetos.

2.2.4.1 Processo de Avaliação de Oportunidades

Como podem ser observados na Figura 2.2 os principais passos no processo de avaliação de oportunidades para o desenvolvimento sustentável são:

- Familiarização: assegurar, através de oficinas de formação e treinamento, que os interessados estejam conscientes do significado da sustentabilidade no contexto de sua operação.
- Meta: gerar objetivos dentro do contexto do projeto que englobem tanto os objetivos usuais de operação, como custos de capital, quanto os objetivos do desenvolvimento sustentável como o consumo de energia e a geração de gases de efeito estufa.
- Identificação: Com base nos princípios da ecologia industrial, as potenciais oportunidades devem ser identificadas e agrupadas. Este é um passo crítico, através do qual soluções novas e inovadoras devem ser levantadas.
- Avaliação – a fim de identificar e aplicar as ferramentas selecionadas que irão quantificar e classificar essas oportunidades. Exemplos incluem a avaliação do ciclo de vida, créditos de carbono, avaliação social, engenharia ambiental e etc.

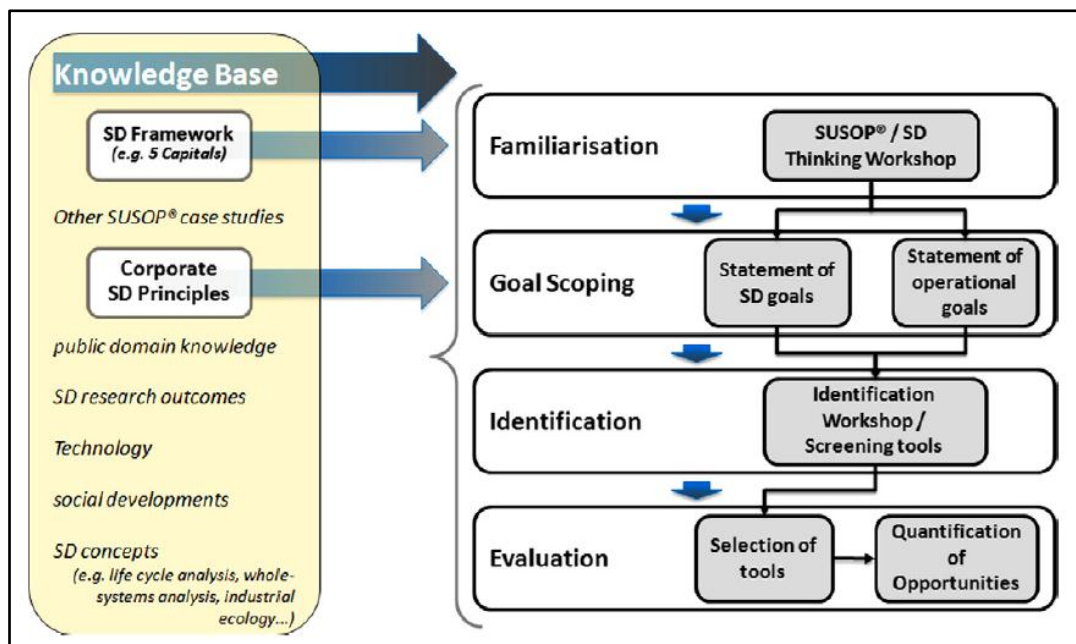


Figura 2.2 – Processo de Avaliação de Oportunidades (Corder *et al.*, 2009)

2.2.4.2 Desenvolvimento Sustentável e Ciclo de Gestão de Projetos na Indústria Mineral

Em virtude dos prazos, as fases do projeto têm diferentes níveis de viabilidade para mudanças que possam incorporar os princípios de sustentabilidade. Frequentemente, as iniciativas no sentido de utilizar ferramentas de sustentabilidade têm sido tomadas tardiamente, tipicamente quando a usina de processamento mineral já se encontra em fase de construção ou, pior, quando já se encontra em operação, deixando pouca oportunidade para fazer qualquer mudança significativa no projeto. Por outro lado, quando adotadas ainda na fase de concepção do projeto, elas podem ser responsáveis por mudanças positivas. O método SUSOP deve ser desenvolvido para trabalhar de maneira produtiva e em paralelo com um conjunto de tarefas, orçamentos e cronogramas, para a integração de indicadores de desempenho e de sustentabilidade. Diferentes critérios, ferramentas e metodologias são aplicáveis em diferentes escalas e podem ser previstos na fase inicial de projeto. O objetivo do SUSOP é orientar o usuário quanto às metodologias adequadas a cada fase (Corder *et al.*, 2009).

2.2.5 Indicadores de Sustentabilidade

Para saber se uma atividade é ou não sustentável, é necessário lançar mão de uma série de indicadores que permitam medir os impactos da atividade do homem na natureza.

Segundo Pimiento (2000), os indicadores de sustentabilidade são utilizados para determinar o desempenho obtido no cumprimento de metas de sustentabilidade de determinados setores ou atividades econômicas, permitindo, desta forma, fazer comparações com parâmetros correspondentes relativos a outros períodos de tempo e/ou espaços geográficos. Portanto, desde a sua concepção e estruturação, tais indicadores buscam estabelecer mecanismos gerenciais de estímulo ao melhoramento ambiental e, conseqüentemente, ao desenvolvimento sustentável.

Na indústria mineral, tais indicadores devem focalizar todo o processo de suprimento mineral, envolvendo as atividades de exploração, desenvolvimento, extração, transporte, transformação e utilização do bem mineral.

Segundo Villas Bôas e Beinhoff (2002), o processo de identificação e seleção de indicadores de sustentabilidade deve concentrar-se em questões operacionais, a fim de quantificar e qualificar o nível de conformidade da indústria mineral com o desenvolvimento sustentável. O objetivo é estimar indicadores quantitativos e qualitativos para a realização de avaliações absolutas e relativas.

A Tabela 2.4 lista um resumo de referências que poderão ser usadas para a seleção dos indicadores de sustentabilidade.

Tabela 2.4 - Indicadores de Sustentabilidade da Indústria Mineral (Villas-Bôas, 2002)

Referência	Indicadores
Energia	Consumo Total Perfil de Consumo por Fonte Participação de Fontes Renováveis Auto-geração Reuso Consumo por Unidade de produto
Água	Consumo Total Tratamento Reciclagem e Reuso Qualidade da Água Descartada Consumo por Unidade de produto
Terra	Área Total Ocupada Perfil de Área Ocupada (%) Operações de Mina Operações de Tratamento Disposição de Barragens e Resíduos Estradas Área Natural Atingida (%) Área Natural Protegida (%) Área Natural Recuperada (%)
Materiais	Consumo por Tipo Perfil de Consumo por Tipo Consumo de Materiais Perigosos Reciclagem e Reuso Consumo por Tipo / Unidade de Produto
Efluentes, Emissões e Resíduos	
Plano de Fechamento da Mina	

De acordo com Pimiento (2000), os indicadores de sustentabilidade para a indústria mineral devem responder às seguintes questões relativas a cada empreendimento:

- Estão sendo assegurados o adequado aproveitamento do depósito e o possível alongamento de sua vida útil?
- Os impactos associados às atividades operacionais apresentam-se inferiores em relação a períodos anteriores ou a empreendimentos similares?
- Os índices de consumo de energia e de materiais por unidade de produto extraído / beneficiado apresentam-se inferiores em relação a períodos anteriores ou a empreendimentos similares?

- O modelo de gestão utilizado apresenta-se mais participativo em relação a períodos anteriores ou a empreendimentos similares?

2.3 Beneficiamento de Minério

O tratamento ou beneficiamento de minérios consiste de operações, aplicadas aos bens minerais, visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma sem, contudo, modificar a identidade química ou física dos minerais (Tavares, 2009).

Nem sempre esses minerais apresentam-se na natureza na forma em que serão consumidos pela indústria, quer seja por suas granulometrias, quer por estarem associados a outros minerais, que não têm interesse ou são indesejáveis para o processo industrial a que se destinam. É exatamente para a adequação dos minerais aos processos industriais que se utiliza o beneficiamento dos minérios. A intensidade do tratamento necessário depende do teor do minério na jazida, assim como da especificação desejada do produto. A fim de atingir essa especificação, a qual é normalmente dada em termos de um teor mínimo de metal de interesse ou de um teor máximo de algum tipo de contaminante, torna-se necessária a concentração do minério (Tavares, 2009).

O processamento mineral consiste de uma série de processos que têm em vista a separação física dos minerais de interesse da ganga e a obtenção final de um concentrado. Os métodos utilizados podem ser físicos ou químicos.

De um modo geral, o tratamento de minérios pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Preparação;
- Concentração;
- Desaguamento.

Em um fluxograma típico de tratamento de minérios, ilustrado na Figura 2.3, as operações unitárias são assim classificadas:

- Cominuição: britagem e moagem;
- Peneiramento (separação por tamanhos) e classificação (ciclonação, separação em classificador espiral);
- Concentração gravimétrica, magnética, eletrostática, por flotação, dentre outras;
- Desaguamento: espessamento e filtração;

- Secagem: secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado;
- Disposição ou descarte de rejeito.

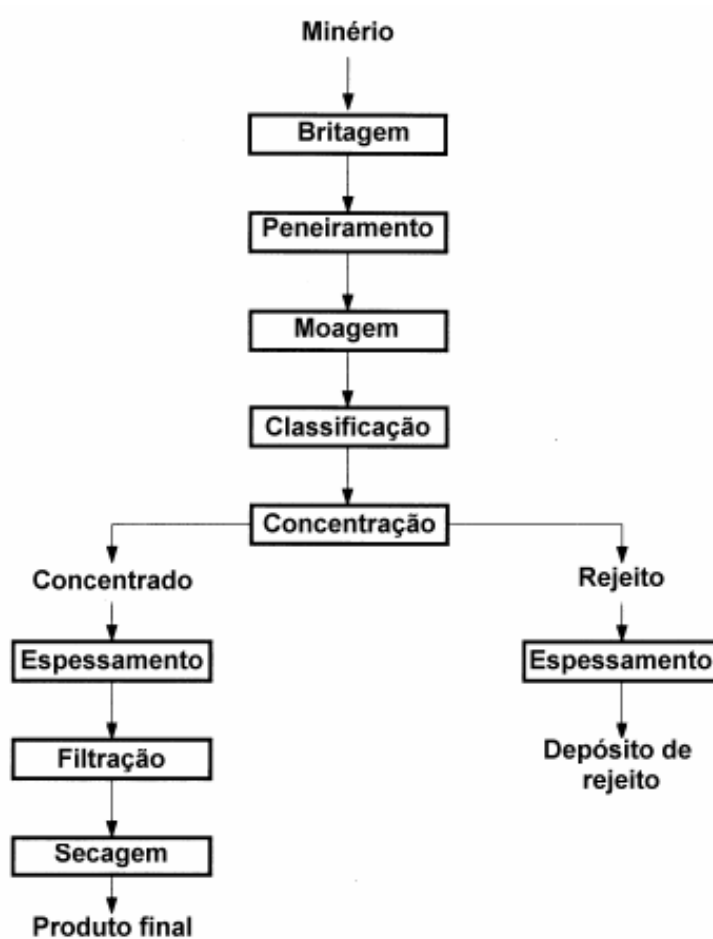


Figura 2.3 - Fluxograma típico de tratamento de minérios (Tavares, 2009)

A etapa de preparação diz respeito às operações de cominuição e separação por tamanhos, que visam liberar os componentes minerais. Isto implica que uma partícula deve apresentar, idealmente, uma única espécie mineralógica. Como as operações de redução de tamanho são dispendiosas, principalmente devido ao consumo de energia e ao desgaste com corpos moedores e revestimento, deve-se fragmentar só o estritamente necessário para a operação seguinte. Para evitar uma cominuição excessiva, faz-se uso de operações de separação por tamanho ou classificação nos circuitos de cominuição.

A cominuição, fragmentação ou redução de tamanho é uma técnica de vital importância no processamento mineral. Um minério deve ser fragmentado até que os minerais de interesse contidos sejam fisicamente liberados dos minerais de ganga. Nos

casos de minérios de alto teor esta etapa já é responsável pela geração do produto final. Esse é o caso de alguns minérios, do agregado para a construção civil e de rochas calcárias. Em todos os casos, a cominuição é uma operação que envolve elevado consumo energético e baixa eficiência operacional, representando o maior custo no tratamento de minérios.

A classificação é o processo de separação de partículas por tamanho. Opera, geralmente, junto com as etapas de cominuição, pois controla os tamanhos que são gerados neste processo. A classificação tem como objetivos principais:

- Separar as partículas do minério;
- Verificar se a granulometria produzida nos equipamentos de cominuição atingiu o tamanho no qual as partículas dos minerais de interesse já se separaram fisicamente dos minerais de ganga.

Os equipamentos de classificação mais comuns são:

- Peneiras: utilizadas apenas para a classificação de partículas mais grosseiras, usualmente trabalham com os produtos da britagem. Podem operar a seco e a úmido;
- Classificadores mecânicos: operam com tamanho de partículas menores que as peneiras, mas são ineficientes para trabalhar com partículas muito finas, em média menores que 0,105 milímetros. Trabalham quase sempre a úmido. Exemplo típico: classificador espiral ou helicoidal;
- Ciclones: utilizados na faixa de tamanhos onde os classificadores mecânicos atuam, com a diferença que são muito eficientes para separarem partículas muito finas. Podem também operar a seco ou a úmido.

As operações de concentração visam à separação seletiva de minerais e se baseiam nas diferenças de propriedades físicas e físico-químicas, como densidade, suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, hidrofobicidade, cor, formato, radiatividade e luminescência, entre a ganga e o mineral de interesse. Em muitos casos, também se requer a separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse.

Os principais métodos de concentração são:

- Separação/Concentração Gravítica ou Gravimétrica: método que apresenta bons resultados com baixo custo. O processo se baseia na diferença de densidade existente entre os minerais presentes, utilizando-se de um meio fluido (água ou

ar) para efetivar a separação/concentração. Os equipamentos tradicionalmente utilizados são os jígues, mesas vibratórias, espirais, cones e calhas (*sluices*). O método é adotado na produção de ouro, ilmenita, zirconita, monazita, cromita, cassiterita etc.

- **Separação Magnética:** a propriedade determinante nesse processo é a suscetibilidade magnética. Baseado nesse fato, os minerais podem ser divididos em três grupos, de acordo com o seu comportamento, quando submetidos a um campo magnético natural ou induzido: ferromagnéticos (forte atração), paramagnéticos (média e fraca atração) e diamagnéticos (nenhuma atração). Os processos podem ser desenvolvidos via seca ou via úmida. Os equipamentos mais utilizados são os tambores, correias, rolos, carrosséis e filtros. A separação magnética é adotada na produção de minério de ferro, areias quartzosas, feldspatos, etc.
- **Flotação:** atualmente é o processo dominante no tratamento de quase todos os tipos de minérios, devido à sua grande versatilidade e seletividade. Permite a obtenção de concentrados com elevados teores e expressivas recuperações. É aplicado no beneficiamento de minérios com baixo teor e granulometria fina. O processo se baseia no comportamento físico-químico das superfícies das partículas minerais presentes numa suspensão aquosa. A utilização de reagentes específicos, denominados coletores, depressores e modificadores, permite a recuperação seletiva dos minerais de interesse, por adsorção em bolhas de ar. Os equipamentos tradicionalmente adotados se dividem em duas classes, mecânicos e pneumáticos, dependendo do dispositivo utilizado para efetivar a separação. A flotação é adotada na produção de areias quartzosas de elevada pureza, cloretos, feldspatos, fluorita, fosfatos, magnesita, sulfetos, talco, mica, berilo, etc.
- **Seleção Manual:** é o método mais antigo de concentração. Através de uma inspeção visual, os minerais de interesse são manualmente resgatados do restante ou, apenas os minerais contaminantes são separados para purificar o minério original. Devido ao crescente custo da mão de obra, ela vem sendo utilizada somente em casos especiais. Atualmente a seleção de minérios segue o mesmo princípio, porém de forma mecanizada e se utilizando de dispositivos automáticos de detecção, identificação e separação. As propriedades mais utilizadas são as óticas (refletância, transparência, etc.), raios X (fluorescência),

condutividade elétrica, magnetismo e radioatividade. A seleção automatizada é adotada na recuperação de diamantes, pedras preciosas e minerais nobres.

Na maioria das vezes, as operações de concentração são realizadas a úmido. A utilização ou o processamento subsequente dos produtos requer a remoção ou recuperação da água contida neles. Esta operação, chamada desaguamento, além de eliminar parte da água do concentrado, também tem por objetivo reciclar parte da água contida nos rejeitos para uso na usina de beneficiamento (Ministério de Minas e Energia).

Além das operações acima, também existem as operações auxiliares de transporte e manuseio de sólidos. Essas são responsáveis pela homogeneização dos sólidos, a fim de minimizar as variações qualitativas na alimentação das várias operações unitárias, ou pelo transporte dos sólidos, estejam eles secos ou na forma de polpas, dentro da usina de processamento.

2.3.1 Cominuição

Segundo Tavares (2009), a cominuição representa entre 50 e 75% dos custos diretos de produção da maior parte das usinas de concentração na indústria mineral e a maior parte destes custos ocorrem devido ao consumo de energia e desgaste de metal.

A aplicação de cada tipo de equipamento de cominuição ou separação por tamanhos depende de diversos fatores como o tamanho de partícula da alimentação, as características mecânicas do minério, a escala de produção, dentre outros. Na indústria a cominuição é dividida nos estágios de britagem e de moagem.

2.3.1.1 Britagem

De acordo com Luz *et al.* (2004), a britagem é a operação que fragmenta os blocos obtidos na lavra, representando o primeiro estágio do processo de cominuição. É realizada sempre a seco e em múltiplos estágios, mudando-se o equipamento, até se obter um material adequado à alimentação da moagem. Na indústria utilizam-se diversos tipos de britadores, dependendo do tipo de material, capacidade e razão de redução desejada.

A britagem consiste da quebra do material principalmente por esforços compressivos e por impacto. Os esforços compressivos são aplicados pelo movimento periódico de aproximação e afastamento de uma superfície móvel contra outra fixa, já o impacto é resultante da projeção de partículas contra elementos do britador ou do revestimento.

Os britadores de grande porte são empregados na britagem primária e sempre operam em circuito aberto. São eles: britador de mandíbulas, britador giratório e o de rolos dentado. Os britadores citados, por empregarem o princípio da fragmentação por compressão, apresentam razões de redução relativamente limitadas. Britadores de mandíbulas são mais adequados no processamento de materiais úmidos e que contenham argila, enquanto britadores giratórios são mais adequados para altas taxas de alimentação (Tavares, 2009).

O primeiro deles é composto por duas mandíbulas, uma fixa e uma móvel, ligada ao excêntrico, sendo com isso, responsável pelo movimento de aproximação e afastamento entre elas. A alimentação desce entre as mandíbulas enquanto recebe o impacto responsável pela fragmentação. O britador de mandíbulas, mostrado na Figura 2.4, é utilizado para a britagem de blocos de elevadas dimensão e dureza e alimentações com grandes variações granulométricas. Razões de redução entre 2 a 3 são normalmente atingidas (Tavares, 2009).

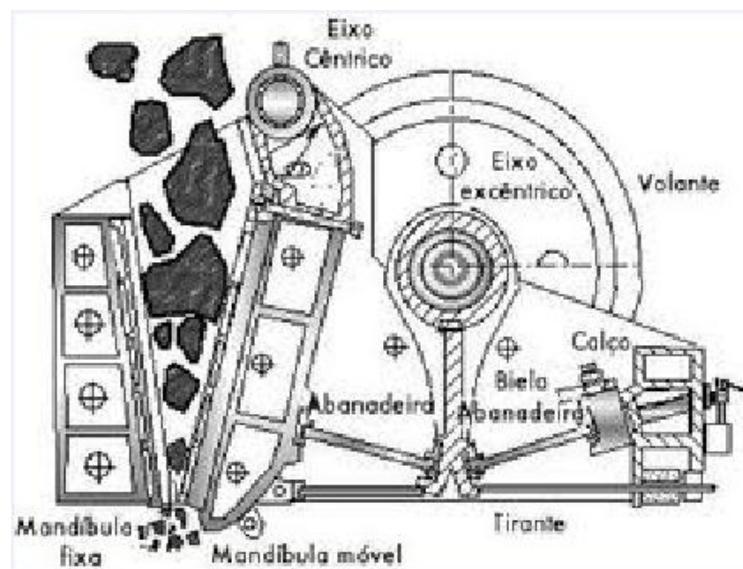


Figura 2.4 - Britador de mandíbulas

O princípio de funcionamento do britador giratório se baseia no movimento circular do cone central, feito de aço de alta dureza, em relação à carcaça. Este britador possui uma superior capacidade de processamento em relação ao britador de mandíbulas. Isto ocorre graças ao movimento circular que faz com que toda a área da carcaça seja utilizada na britagem (Luz *et al.*, 2004). De acordo com Tavares (2009), britadores giratórios atingem razões de redução tipicamente entre 3 e 4.

O britador de rolo dentado consiste basicamente de um rolo dentado móvel e uma carcaça fixa. A compressão e cisalhamento do material são provocados pelo movimento giratório do rolo que ocorre entre os dentes e a placa fixada à câmara. Possui aplicação para rochas de fácil fragmentação devido ao grande desgaste dos dentes, o que torna seu emprego limitado. Na britagem primária é o equipamento que produz menos finos (Luz *et al.*, 2004).

A britagem secundária tem como objetivo principal a redução granulométrica do material para a moagem. Para aumentar a capacidade de produção é comum, nesta etapa, o descarte prévio da fração fina na alimentação. Os equipamentos normalmente utilizados são o britador cônico, britador de rolos, de eixo horizontal, de impacto vertical e o britador (ou moinho) de rolos de alta pressão (HPGR).

O britador cônico, mostrado na Figura 2.5, possui o mesmo princípio de operação do britador giratório, com a diferença de que neste o manto e o cone apresentam longas superfícies paralelas, o que garante um tempo longo de retenção das partículas nessa região. Um parâmetro importante e que afeta bastante o desempenho do britador é o ângulo do cone que quanto mais horizontal menor a capacidade e mais fina a granulometria do produto (Luz *et al.*, 2004). Na indústria mineral os britadores cônicos são os mais utilizados para britagem intermediária e fina e operam a razões de redução entre 3 e 4 (Tavares, 2009).

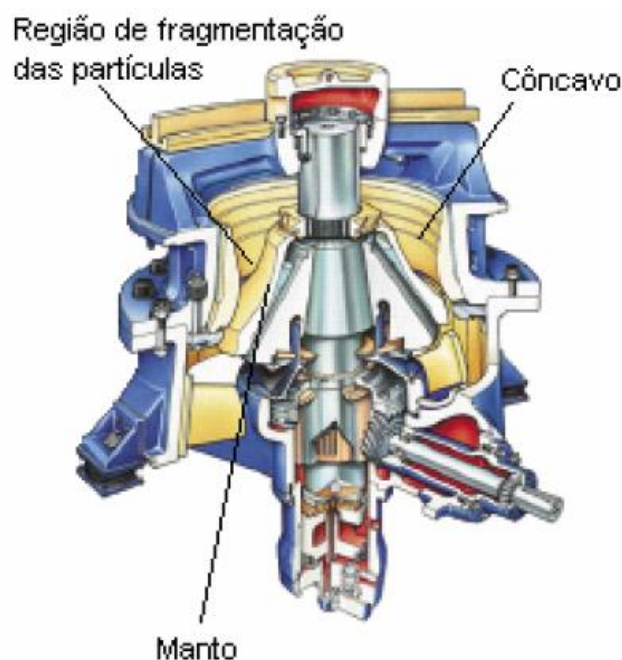


Figura 2.5 - Britador cônico

O britador de rolos consiste de dois rolos de aço, separados por uma distância definida, que giram à mesma velocidade e em sentidos contrários. Sua aplicação é limitada a materiais de baixa abrasividade, pela elevada taxa de desgaste abrasivo dos rolos, e também quanto à granulometria da alimentação, pois a mesma é limitada pela distância entre os rolos e seus diâmetros. Rolos de grandes diâmetros fazem com que elevadas razões de redução sejam obtidas. No entanto, isso faz com que esses tipos de britadores apresentem o maior custo de investimento entre os britadores secundários. Sua razão de redução máxima é da ordem de 3 e possuem baixa capacidade de processamento, apresentando somente a vantagem da pequena geração de ultrafinos (Luz *et al.*, 2004).

No britador de impacto vertical (VSI) uma parte do material alimentado vai para o interior de um rotor, que projeta esse material a altas velocidades contra as paredes da câmara. A outra parte passa por fora do rotor, na forma de cascata, e colide com as partículas que passaram pelo seu interior. Isto faz com que o processo se caracterize como um processo autógeno de cominuição. Pode-se dizer que esses britadores apresentam baixo consumo energético e desgaste, além de uma pequena proporção de ultrafinos. No entanto, possuem uma baixa razão de redução, sendo raramente superior a 2 (Tavares, 2009, Luz *et al.* 2004).

No britador de eixo horizontal, mais frequentemente chamado de moinho, a fragmentação é feita por impacto. Com o movimento das barras, parte da energia cinética é transferida para o material que é projetado sobre as placas fixas do britador, onde ocorre a fragmentação. Dois exemplos são o britador de impacto e o britador de martelos. De acordo com Luz *et al.* (2004), a desvantagem do uso desse equipamento se dá por apresentar elevado custo de manutenção e grande desgaste, não sendo aconselhável seu uso para rochas abrasivas. Restrições ambientais podem limitar sua aplicação devido à poeira excessiva gerada por este tipo de britador. No entanto apresentam elevada capacidade e razões de redução, com menor consumo de energia e alta percentagem de finos (Tavares, 2009).

O HPGR, mostrado na Figura 2.6, consiste de dois rolos, sendo um fixo e o outro pressurizado. A alimentação é feita de modo que um leito de partículas se forma entre os rolos, sendo comprimido por eles. Dentre os fatores que contribuíram para o crescente sucesso do HPGR estão a faixa granulométrica do produto, elevadas razões de redução, baixo consumo de energia e a criação de microfissuras que proporcionam a diminuição da resistência do produto. Estima-se que o consumo de metal devido ao desgaste seja de 50 a 70 vezes menor do que em moinhos convencionais. Entretanto, além de difícil reposição, o custo unitário do metal usado no revestimento de rolos é significativamente maior que em moinhos de bolas. Sendo assim a aplicabilidade do HPGR a minérios muito abrasivos é ainda questionável (Tavares, 2009, Delboni, 2007). De acordo com Tavares (2009), aplicações potenciais deste equipamento estão na preparação do material para a moagem fina, na substituição das operações de britagem terciária, moagem em moinhos de barras e moagem primária de bolas.

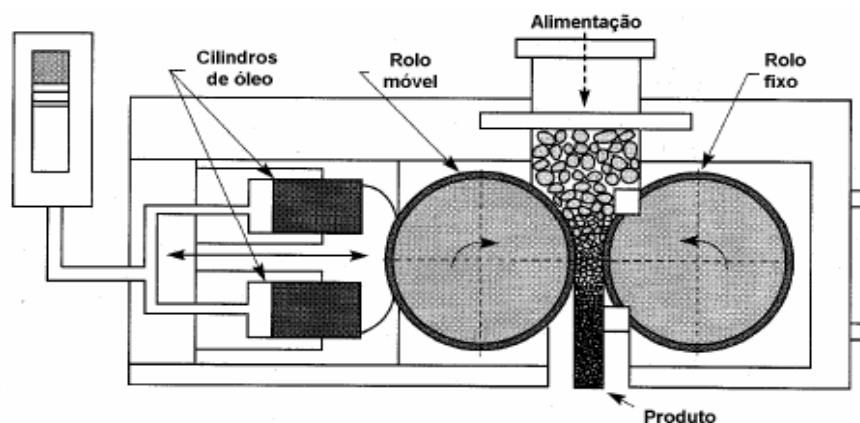


Figura 2.6 - Britador de rolos de alta pressão (HPGR)

2.3.1.2 Moagem

A moagem é o ultimo estágio da cominuição. Nele as partículas são reduzidas pela combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito. Cada minério tem uma malha ótima para ser moído, dependendo de fatores como a distribuição do mineral de interesse na ganga e o processo de separação usado em seguida.

Segundo Luz *et al.* (2004), esta área requer maiores investimentos e maiores gastos de energia. Portanto a operação deve ser muito bem estudada na etapa de dimensionamento e escolha do equipamento e muito bem controlada na etapa de operação da usina, uma vez que o desempenho de uma instalação industrial depende muito desta operação.

A moagem é normalmente realizada em moinhos tubulares preenchidos com corpos moedores de diversos tipos e tamanhos. Estes, por sua vez, ficam livres para se mover dentro do moinho e isto se dá pela ação rotativa, planetária, vibratória ou por agitação. Utiliza-se como corpos moedores, barras, bolas, cilindros curtos de aço (chamados Cylpebs), pedaços de rocha dura e partículas do próprio minério que ocupam normalmente entre 20 e 80 % do volume interno do moinho. São frequentemente feitos de aço pela alta densidade e relativamente baixo custo (Tavares, 2009).

De acordo com Tavares (2009), todos os tipos de moinho podem ser utilizados na moagem a seco ou a úmido, entretanto, sempre que possível a moagem deve ser realizada a úmido.

Além de proteger a carcaça do moinho do desgaste, o revestimento tem como objetivo prevenir o escorregamento dos corpos moedores e da polpa, em relação à carcaça do moinho, já que o escorregamento irá consumir energia desnecessariamente (Tavares, 2009).

O moinho de barras é utilizado tanto na moagem grosseira como na moagem fina. Podem suportar uma alimentação tão grossa quanto 50 mm e fornecer um produto tão fino quanto 500 μm . Para este tipo de moinho razões de redução entre 15 e 20 são comuns. Possuem uma importante vantagem em relação aos outros moinhos, já que a ação moedora das barras tende a evitar a sobremoagem de partículas finas. Sua maior aplicação é no primeiro estágio de moagem em circuito aberto seguida de moinhos de bolas em circuito fechado no segundo estágio. Esses circuitos são os mais eficientes energeticamente, porém possuem o maior investimento de capital.

O moinho de bolas, mostrado na Figura 2.7, é mais adequado à moagem fina nos estágios finais de fragmentação. São capazes de atingir elevadas razões de redução, porém possuem baixa eficiência energética (Tavares, 2009, Luz *et al.*, 2004).

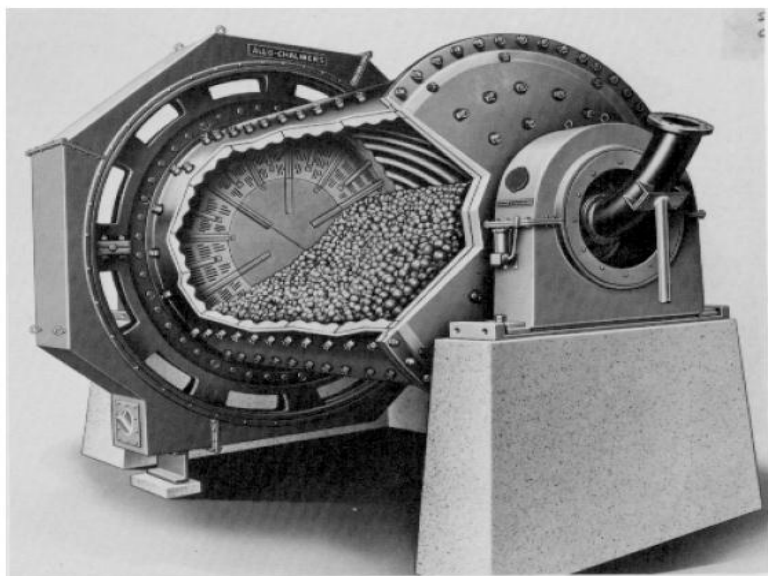


Figura 2.7 – Moinho de bolas

No moinho de seixos, cascalhos maiores do que 70 mm são utilizados como corpos moedores. Possui características semelhantes às do moinho de bolas, porém com menor capacidade devido à menor densidade dos seixos em relação às bolas de aço. São normalmente empregados na moagem fina (Tavares, 2009).

Os moinhos autógenos (AG) são os equipamentos de cominuição que utilizam partículas do próprio minério como corpos moedores. Já os moinhos semi-autógenos (SAG) utilizam além de partículas do próprio minério, uma pequena carga de bolas, correspondente a até 10 % do volume (Tavares, 2009). Na cominuição existe uma fração mais resistente à moagem, com tendência a retornar várias vezes do classificador como carga circulante, que reduz a capacidade do moinho e aumenta o consumo de energia. Com a moagem semi-autógena, essa fração é mais facilmente fragmentada. No entanto, esta prática traz algumas desvantagens como o aumento do desgaste do revestimento e o consumo de bolas (Luz *et al.*, 2004).

Os moinhos autógenos possuem algumas vantagens em relação aos convencionais, como flexibilidade, simplicidade de operação, capacidade unitária

elevada, relações de redução extremamente altas, não contaminação pelo meio moedor, um menor custo de operação, devido à diminuição dos gastos com britagem ou eliminação desta, nenhum gasto com bolas e automação do processo. Porém possuem um custo de investimento superior ao da moagem convencional (Luz *et al.*, 2004, Delboni, 2007).

Moinhos autógenos e semi-autógenos têm seu uso principal no primeiro estágio da moagem em instalações que usam moinho de bolas ou de seixos no segundo estágio. Esses circuitos são os que apresentam o menor nível de investimento, por dispensar a britagem fina. Segundo Tavares (2009), o consumo energético de moinhos autógenos e semi-autogénos é maior que nos tipos anteriores em cerca de 20 a 30 %. Por outro lado o consumo de metal é ausente, ou menor do que na moagem convencional.

Atualmente, moinhos semi-autógenos, mostrado na Figura 2.8, competem com britadores na realização da britagem fina, ou moagem grosseira, do minério. Apresentam ainda algumas vantagens como: menos poeira, baixa intervenção de pessoal devido à automação, elevada capacidade unitária, mínimo de paradas não planejadas e menor custo de instalação.

Por fim, existem ainda os moinhos utilizados na moagem ultrafina, que são o moinho vibratório, o atritor, o planetário e o de jato de ar (Tavares, 2009).

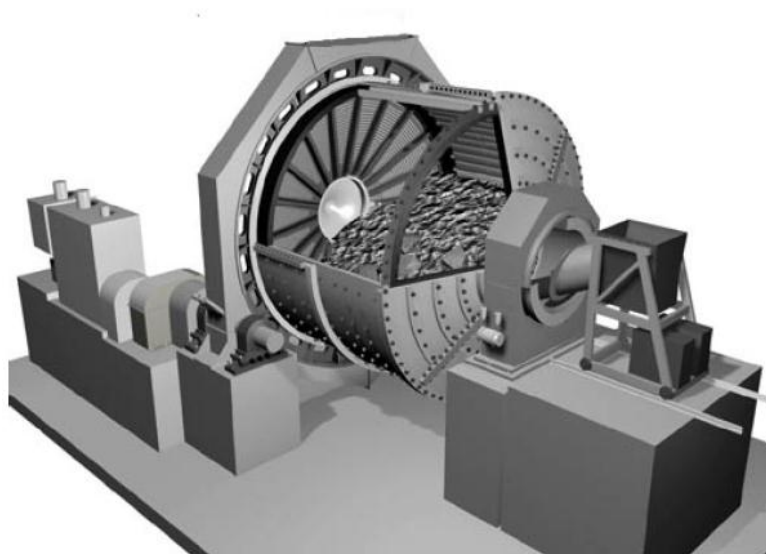


Figura 2.8 – Moinho semi-autógeno (SAG)

2.4 Consumo de Energia

2.4.1 Aspectos Gerais

Na indústria mínero-metalúrgica, seguir os conceitos do desenvolvimento sustentável significa minimizar as massas envolvidas na produção, sejam elas de solo, de rocha, de água ou de resíduos; ainda, minimizar as energias de processo e inclusive selecionar a melhor fonte produtora de energia, caso esta opção se apresente.

Conforme discutido previamente, os processos de cominuição são responsáveis por até 80 % da energia elétrica consumida no processamento mineral (Wills, 1997). De acordo com um estudo realizado na década de 1970, o consumo energético direto e indireto, pela fabricação de corpos moedores e revestimentos, na cominuição de minérios, cimento e grãos, representava aproximadamente 1,5 % da energia elétrica total consumida nos EUA (Herbst, 1981). A estimativa mais recente é que aproximadamente 4 % da energia elétrica mundial seja utilizada nesta operação (Walstra *et al.*, 2008).

Nesse sentido, os processos de cominuição apresentam um grande potencial de redução do consumo de energia, pois ainda possuem eficiências energéticas muito baixas. Esta redução pode ser alcançada pelo uso de equipamentos energeticamente mais eficientes nos novos projetos ou pela otimização das operações já existentes (Musa e Morrison, 2008). Um exemplo é o uso da prensa de rolos em substituição à moagem na redução do consumo de energia e aumento da eficiência energética de circuitos industriais de cominuição.

Um estudo realizado por Rosario e Hall (2008) comparou, por meio de dois estudos de caso industriais, o consumo energético de circuitos que empregam o HPGR e o moinho SAG. As duas opções de circuito foram SABC (moinho SAG com britador de reciclo, seguido de moinhos de bolas) e três estágios de britagem seguido do HPGR. Um resumo dos resultados é apresentado na Tabela 2.5, que mostra que os circuitos com HPGR proporcionam economias de energia da ordem de 11,7% e 18,4 % para os minérios A e B respectivamente. O minério A pode ser considerado de média tenacidade e o minério B de elevada tenacidade. No estudo de caso foi considerado todo o circuito, ou seja, com todos os equipamentos acessórios contidos no projeto. A partir desses resultados se torna bastante claro o elevado potencial do HPGR em eficiência energética para esses tipos de minérios.

Tabela 2.5 – Consumo de energia do circuito completo de cominuição (Rosario e Hall, 2008)

Descrição	Caso A		Caso B	
	Potência Total (kW)	Energia Específica (kWh/t)	Potência Total (kW)	Energia Específica (kWh/t)
Circuito SABC				
Equipamentos de Cominuição	33.765	14,73	25.599	15,36
Alimentadores e Transportadores	610	0,27	575	0,34
Bombas	1.649	0,72	1.199	0,72
Sistemas de desempoeiramento e outros	26	0,01	28	0,02
Total	36.050	15,73	27.402	16,44
Circuito HPGR				
Equipamentos de Cominuição	25.286	11,03	17.881	10,73
Alimentadores e Transportadores	3.660	1,60	2.388	1,43
Peneiras	300	0,13	195	0,12
Bombas	1.731	0,76	1.259	0,76
Sistemas de desempoeiramento e outros	872	0,38	634	0,38
Total	31.850	13,90	22.357	13,41
Energia economizada com o circuito HPGR	11,7%		18,4%	

Rosario e Hall (2008) destacam ainda que a utilização de corpos moedores geralmente está associada a um elevado custo operacional. Graças à sua eliminação com o uso do HPGR, menores emissões de gases do efeito estufa puderam ser alcançadas.

2.4.2 Eficiência Energética

O conhecimento da eficiência energética global, levando em conta não somente a energia diretamente empregada em moinhos e britadores, manuseio e separação, mas também a energia necessária para a fabricação dos consumíveis e emissões de gases de efeito estufa, é essencial para escolha das tecnologias a serem adotadas em projetos de usinas de cominuição (Tavares, 2008).

Nesse contexto, a melhoria no aproveitamento de energia utilizada na fragmentação apresenta impactos não apenas nas margens de lucro do empreendedor, mas também na demanda de energia.

As medidas tradicionais de eficiência energética apenas consideram a energia direta consumida, ou seja, a potência líquida do motor. Entretanto, a chamada energia indireta, utilizada nos processos auxiliares, tais como manuseio e classificação dos materiais, fabricação de corpos moedores e revestimentos, pode representar uma fração

substancial de energia (Musa e Morrison, 2008). Estes consumíveis requerem uma considerável energia para sua extração, refino e fabricação e esta energia incorporada é muitas vezes excluída. Foi relatado que cerca de 50% da energia consumida nos processos de cominuição está relacionada com a fabricação desses consumíveis (Radziszewski, 2002).

Dentre as etapas de cominuição, a moagem requer uma quantidade significativa de energia. Foi constatado que esta operação utiliza mais de 75% da energia total consumida (La Nauze e Temos, 2002).

Existem vários métodos propostos para estimar a eficiência energética da cominuição e podem ser aplicados a uma ampla gama de equipamentos. Alguns desses métodos são revistos a seguir.

2.4.2.1 Método do Índice de Trabalho Operacional de Bond

O método mais comum de avaliar a eficiência da cominuição é baseado no Índice de Trabalho de Bond, o qual é definido como a energia necessária para reduzir a alimentação de teoricamente infinito a 80% passante em 100 micrometros (Bond, 1952).

O método requer somente a distribuição de tamanho da alimentação e do produto e a medida da potência do motor, além do índice de trabalho de Bond medido em laboratório. Segundo Bond, a energia específica de um equipamento de cominuição pode ser calculada usando a equação:

$$W = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) \quad (2.1)$$

Na qual:

W é a energia específica (95% da potência do motor, em t/h)

W_i é o índice de trabalho do material (em kWh/t)

P é o tamanho de partícula do produto 80% passante (em μm)

F é o tamanho de partícula da alimentação 80% passante (em μm)

O índice de trabalho operacional ($W_{i,o}$) é calculado reordenando a equação acima, dando a expressão:

$$W_{i,o} = \frac{W}{\left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}\right)} \quad (2.2)$$

A eficiência energética é então definida como a razão entre o índice de trabalho do minério, determinado em laboratório (W_i) e o índice de trabalho operacional ($W_{i,o}$), estimado a partir de dados de um circuito industrial de moagem, conforme equação:

$$\text{Eficiência (\%)} = 100 \times \frac{W_i}{W_{i,o}} \quad (2.3)$$

Embora amplamente utilizado, esse método possui algumas limitações, como o fato de presumir que as distribuições de tamanho da alimentação e do produto são paralelas quando lançadas em gráfico de escala logarítmica; é aplicável apenas para circuitos com moinho de barras e de bolas, pois não oferece a mesma precisão quando aplicado a outros tipos de moinhos, como foi demonstrado no estudo realizado por Musa e Morrison (2007); não leva em conta o tipo de equipamento empregado na cominuição e só considera o consumo direto de energia, normalmente a potência líquida do motor do equipamento, não leva em conta a energia indireta que é a energia necessária para a fabricação de consumíveis e para a classificação.

2.4.2.2 Método da Eficiência Operacional de Musa e Morrison

Segundo Musa e Morrison (2008), este método é baseado na hipótese de Von Rittinger (1867, 1962) de área superficial e energia de superfície, no qual a energia necessária para a redução de tamanho é proporcional à nova área superficial formada.

A região de finos é definida como o tamanho abaixo do qual 70 a 80% da área superficial do produto do circuito de cominuição está contida. Para produtos de moinhos AG / SAG e moinhos de bolas, esta é normalmente a fração $-75\mu\text{m}$.

As etapas do desenvolvimento do Método de Musa e Morrison para avaliar a eficiência da cominuição são:

- I. Cálculo da área superficial para todas as frações de tamanho de partícula usando o modelo de área superficial desenvolvido por Michaux (2005).
- II. Definir um marcador sobre a distribuição granulométrica, que contém uma quantidade significativa (70% ou mais) de área superficial do produto de cominuição.
- III. Cálculo do padrão de energia necessária para produzir um novo material na fração de tamanho marcada para o mesmo tipo de minério utilizando o teste padrão de moabilidade de Bond.
- IV. Aplicar os dados da usina para estimar a energia necessária para produzir um novo material com a distribuição granulométrica marcada.
- V. Comparar a energia necessária para obter a eficiência operacional de cominuição.

Musa e Morrison (2008) compararam a eficiência calculada, usando o novo método de $-75\ \mu\text{m}$ com a eficiência calculada pelo método de Bond e os resultados são mostrados na Figura 2.9. Pode-se notar que o método $-75\ \mu\text{m}$ fornece informações semelhantes ao método de Bond para moinhos de bolas. No entanto, este método pode ser usado para avaliar a eficiência operacional dos circuitos de cominuição mesmo que as distribuições de alimentação e de produto não sejam paralelas.

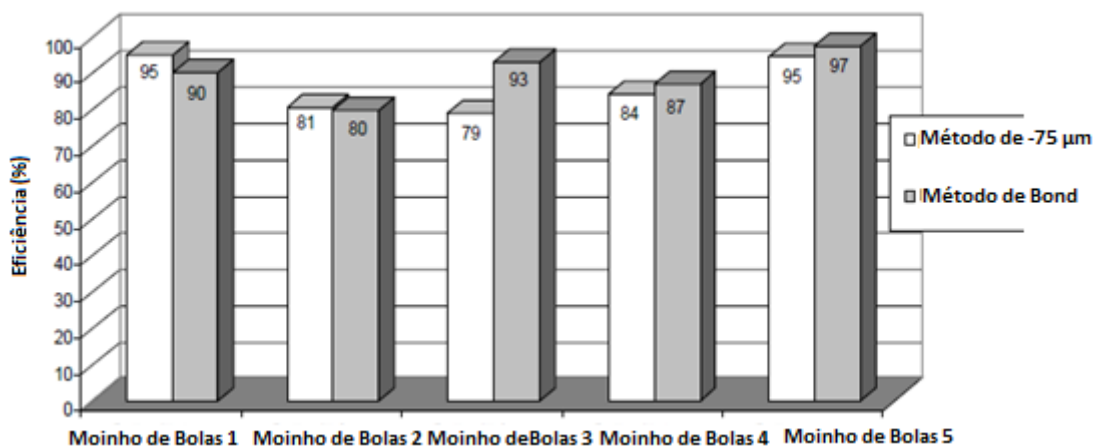


Figura 2.9 - Comparação das eficiências calculadas usando o método de $-75\ \mu\text{m}$ e o método de Bond (Musa e Morrison, 2008)

Este método também foi testado com dados dos moinhos AG, SAG, Vertimills (ou Torre) e IsaMills. A relação entre a moabilidade encontrada em laboratório (Lab75) e a moabilidade em grande escala (OP75) desses moinhos é mostrada na Figura 2.10. Pode-se notar uma forte correlação entre a energia por tonelada (kWh/t) padrão calculada em laboratório pelo - 75 µm e a energia por tonelada (kWh/t) em escala operacional medida a partir da usina para todos os tipos de equipamentos de cominuição. No entanto, usando o método de Bond, esta correlação não é observada para os dados dos moinhos SAG / AG, Vertimill e IsaMill.

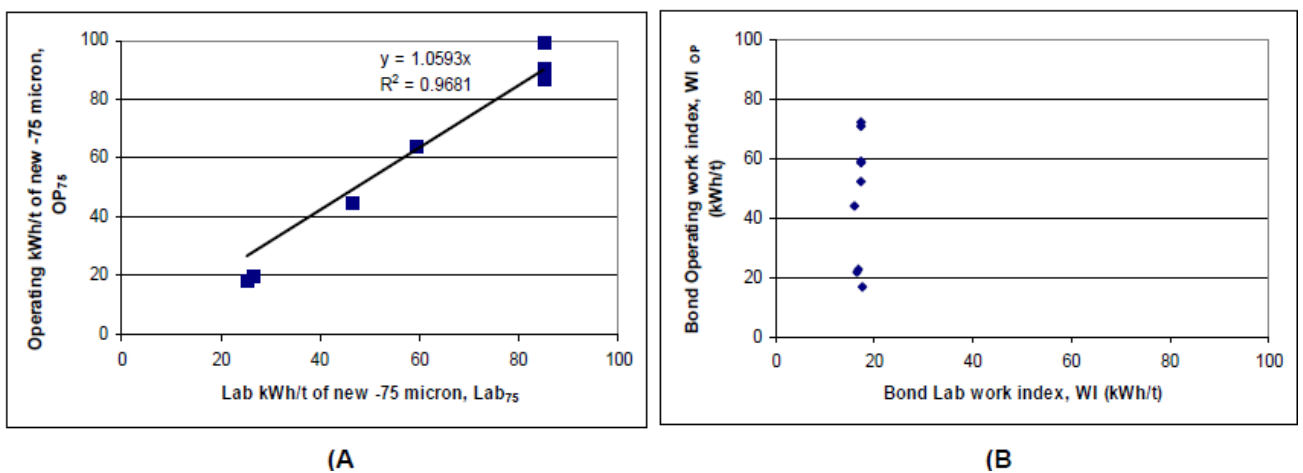


Figura 2.10 - Comparação entre a moabilidade de laboratório e a moabilidade em escala industrial para diferentes equipamentos de cominuição usando o novo método - 75 µm (A) e o método de Bond (B) (Musa e Morrison, 2008)

2.4.2.3 Método de Shi e Kojovic

A eficiência energética dos britadores tem sido avaliada pelo modelo Whiten de britagem, desenvolvido por Anderson e Napier-Munn (1988). Utilizando a função classificação, a função quebra e a distribuição granulométrica da alimentação e do produto, a partir de dados da usina combinados com informações da relação energia-redução de tamanho determinada através do teste de queda de peso, o modelo permite o cálculo da energia total necessária para reduzir a distribuição de tamanhos da alimentação para o produto.

Nos últimos anos, um novo modelo de quebra foi desenvolvido por Vogel e Peukert (2004), incluindo o efeito da propriedade do material, tamanho de partícula e

energia de impacto. No entanto, este modelo não dá uma descrição qualitativa da função quebra. Com isso, em 2006, Shi e Kojovic (2006) modificaram a equação de probabilidade de quebra de Vogel e Peukert (2004) para descrever o índice de quebra, t_{10} (%), em relação às propriedades dos materiais, tamanho de partícula e energia de impacto líquida acumulada, como se pode observar na equação:

$$t_{10} = M[1 - e^{-f_{mat} \times K (E_{cs} - E_{min})}] \quad (2.4)$$

sendo M, K, f_{mat} e E_{min} parâmetros do material, x o tamanho de partícula e E_{cs} a energia específica de impacto.

A eficiência energética dos moinhos de bolas e moinhos SAG foi avaliada usando a mesma abordagem que o modelo de britagem. No entanto, para o cálculo da eficiência na cominuição, foi utilizado o modelo de mistura perfeita e o novo modelo de quebra desenvolvido por Shi e Kojovic ao invés da equação Whiten de britagem e da função quebra. Os resultados encontrados são apresentados nas Tabelas 2.6 e 2.7 para moinhos de bolas e moinhos SAG, respectivamente.

Tabela 2.6 - Eficiência energética de moinhos de bolas calculada pelo novo método (Musa e Morrison, 2008)

Dados da Planta	Potência obtida pelo Teste de Queda de Peso (kW)	Potência Observada (kW)	Eficiência da Cominuição (%)
Bougainville 1	960	3.448	29,0
Bougainville 2	983	3.013	33,0
Bougainville 3	1.032	3.839	27,0
Mount Isa Mine 1	798	2.397	33,3
Mount Isa Mine 2	770	2.381	32,3
Mount Isa Mine 3	800	2.724	29,4
Mount Isa Mine 4	787	2.624	29,9
Mount Isa Mine 5	784	2.609	30,0
Mount Isa Mine 6	813	2.555	31,8

Tabela 2.7 - Eficiência energética de moinhos SAG calculada pelo método de Shi e Kojovic (Musa e Morrison, 2008)

Dados da Planta	Potência obtida pelo teste de queda de peso (kW)	Potência Observada (kW)	Eficiência da Cominuição (%)
Planta 1	3.009	7.731	38,9
Planta 2	3.036	7.695	39,5
Planta 3	3.005	7.926	37,9
Planta 4	3.133	7.910	39,6
Planta 5	2.915	7.577	38,5
Planta 6	2.981	7.620	39,1

Este método oferece uma comparação válida da energia exigida por um equipamento para a cominuição, sem a necessidade de distribuições granulométricas paralelas. Quando a energia consumida na usina é comparada com os resultados do ensaio padrão JK de queda de peso para a cominuição, a eficiência dos moinhos de bolas fica em torno de 30% e dos moinhos SAG em torno de 40%.

2.4.2.4 Método de Tavares

Uma metodologia de cálculo da eficiência energética de moinhos e britadores foi proposta por Tavares (2004), a qual é baseada na comparação da energia necessária para a quebra de partículas individuais e a energia total consumida na usina industrial. Assim, neste método não há desperdício de energia, por exemplo, com colisões de corpos moedores entre si e de corpos moedores contra o revestimento interno do moinho, com deformações elásticas ou plásticas, resultantes de carregamentos insuficientes para a quebra da partícula, ou ainda na forma de atrito ou na compactação dos fragmentos, resultantes de carregamentos excessivos.

O procedimento experimental simula a quebra de partículas individuais, contidas em um intervalo estreito de tamanhos, sob condições de impacto cuidadosamente controladas e em múltiplos estágios, em circuito fechado com uma etapa de classificação ideal. Os resultados da simulação incluem a energia mínima necessária para a cominuição de materiais e a distribuição granulométrica do produto. Esse processo é ilustrado esquematicamente na Figura 2.11.

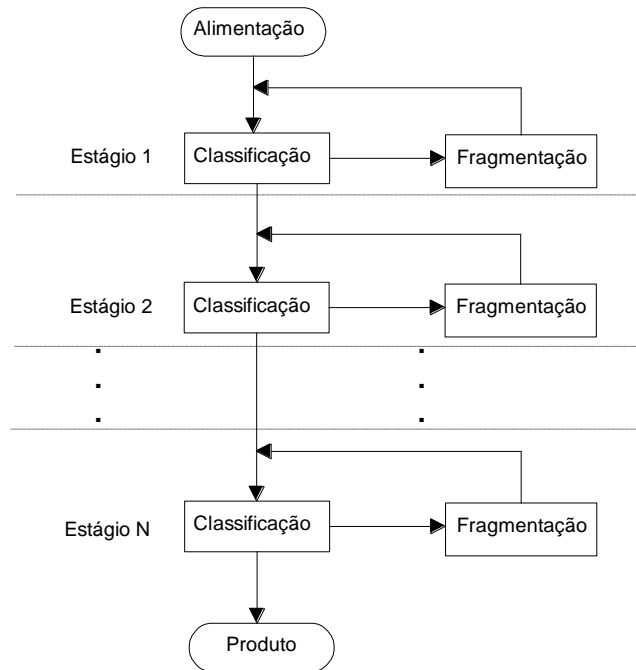


Figura 2.11 - Cominuição em múltiplos estágios com a quebra de partículas individuais em intervalos granulométricos estreitos (Tavares, 2004)

Cada etapa é descrita através de informações da quebra de partículas individuais, obtidas em ensaios com a Célula de Carga de Impacto (CCI). A CCI mede as cargas e as deformações sofridas pela partícula durante o impacto, permitindo, desta forma, calcular a energia absorvida na fratura de partículas individuais, chamada energia específica de fratura, determinar a dependência entre o tamanho e a resistência da partícula, a perda progressiva de resistência sofrida por ela após repetidos carregamentos e a função quebra para diferentes energias de impacto.

A distribuição granulométrica resultante do impacto de cada partícula uma a uma após N estágios é dada por:

$$p_i^{(n)} = p_i^{(n-1)}[1 - F_i(E_K^n)] + \sum_{j=1}^i F_j(E_K^n) p_j^{(n-1)} b_{ij}(E_K^n) \quad (2.5)$$

sendo $p_i^{(n)}$ a fração mássica de tamanho i após o estágio N , b_{ij} a função quebra, correspondente à fração de partículas de tamanho i originadas de um único impacto em partículas de tamanho j com uma energia cinética E_K . $i = 1$ representa a classe mais

grosseira da alimentação. $F_i(E_K)$ é a probabilidade da partícula na classe de tamanhos i fraturar quando sujeita a uma energia de impacto E_K .

O procedimento proposto requer que todas as partículas dentro de um intervalo de tamanhos da alimentação sejam fragmentadas antes do estágio seguinte ser iniciado. Desta forma, as partículas que não quebraram são novamente submetidas a impacto. Assim, a distribuição granulométrica acumulada do produto $p_i^{(j)}$ após o estágio j de carregamento é dada por:

$$\begin{aligned} p_i^{(j)} &= \mathbf{1} \text{ para } i \leq j \\ p_i^{(j)} &= p_i^{(j-1)} + \left(\mathbf{1} - p_j^{(j-1)} \right) \frac{B_{ij}}{B_{jj}} \text{ para } i > j \end{aligned} \quad (2.6)$$

sendo $B_{jj} = B_{ij} - B_{i+1,j}$.

A função quebra depende da energia de impacto e das características das partículas. Assim, ela pode ser normalizada em relação ao tamanho da partícula inicial. Um modelo que a descreve bem é o da distribuição de Rosin-Rammler truncada (King, 2001), dada por:

$$B_{ij} = B(D_i; D_j) = \mathbf{1} - \left(\mathbf{1} - t_{10j} \right) \left(\frac{9}{D_j/d_i - 1} \right)^\alpha \quad (2.7)$$

sendo $d_j = (D_j D_{j+1})^{0,5}$ e α um parâmetro determinado a partir de dados experimentais.

O parâmetro t_{10} , que é a proporção passante em 10% do tamanho da partícula inicial, pode ser calculado por:

$$t_{10j} = A \left(\mathbf{1} - e^{-b' E_K^{(j)} / E_{50j}} \right) \quad (2.8)$$

sendo A e b' parâmetros do modelo. E_K é a energia específica de impacto e E_{50j} é a energia específica de fratura média das partículas da classe de tamanhos j . A razão entre E_K e E_{50j} , denotada por E^* , é chamada de energia relativa de impacto.

E_{50j} possui uma forte dependência com o tamanho de partícula e é descrita por:

$$E'_{50j} = E_{\infty} \left[1 + \left(\frac{D_0}{D_j} \right)^{\phi} \right] \quad (2.9)$$

sendo E_{∞} , D_0 e ϕ parâmetros do modelo, determinados experimentalmente.

A variação da energia específica de fratura média para os materiais estudados é ilustrada na Figura 2.12. Pode-se notar um aumento significativo da mesma com a redução do tamanho das partículas.

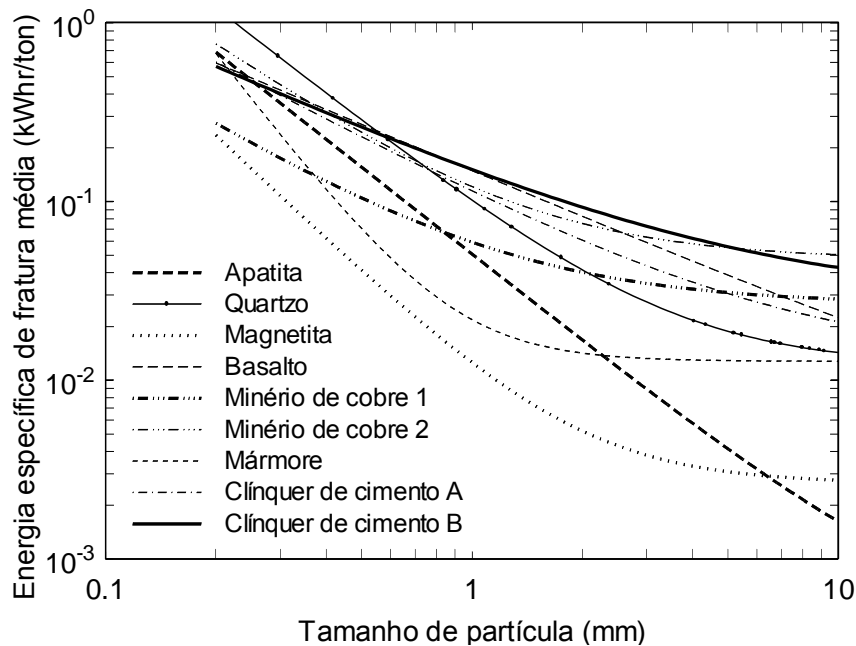


Figura 2.12 - Variação da energia específica de fratura média (E_{50j}) com o tamanho de partícula para os materiais estudados (Tavares, 2004)

O número total de estágios necessários para a fratura do material até a distribuição granulométrica do produto depende da diferença entre o tamanho da

partícula mais grosseira da alimentação D_1 e o tamanho das partículas do produto $D_{prod,máx}$ e também da razão de redução r e pode ser calculado por:

$$N = \frac{\log(D_1/D_{prod,máx})}{\log r} \quad (2.10)$$

A energia total consumida nos N estágios de fratura, E_t , é dada pela soma da energia consumida em cada estágio e é dada por:

$$E_t = \sum_{j=1}^N \frac{(1 - P_j^{(j-1)})}{B_{jj}} n_l^{(j)} E_K^j \quad (2.11)$$

O número médio de impactos necessários para quebrar todas as partículas de uma classe de tamanhos, n_l , é calculado pela razão entre a energia total necessária para quebrar todas as partículas e a energia de impacto para cada evento, sendo a primeira calculada a partir do modelo de mecânica do dano proposto por Tavares e King (2002). É importante observar que para baixas energias de impacto nem todas as partículas irão quebrar no primeiro impacto. Assim, a distribuição das energias de fratura descrita através de uma distribuição log-normal é dada por:

$$F_j(E) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln E - \ln E_{50j}}{\sqrt{2\sigma_E^2}} \right) \right] \quad (2.12)$$

sendo σ_E^2 a variância geométrica da distribuição de energia de fratura.

Na Figura 2.13 pode-se observar que o mármore é o material mais suscetível a fratura por impactos repetidos, ao contrário do quartzo, que é o menos suscetível.

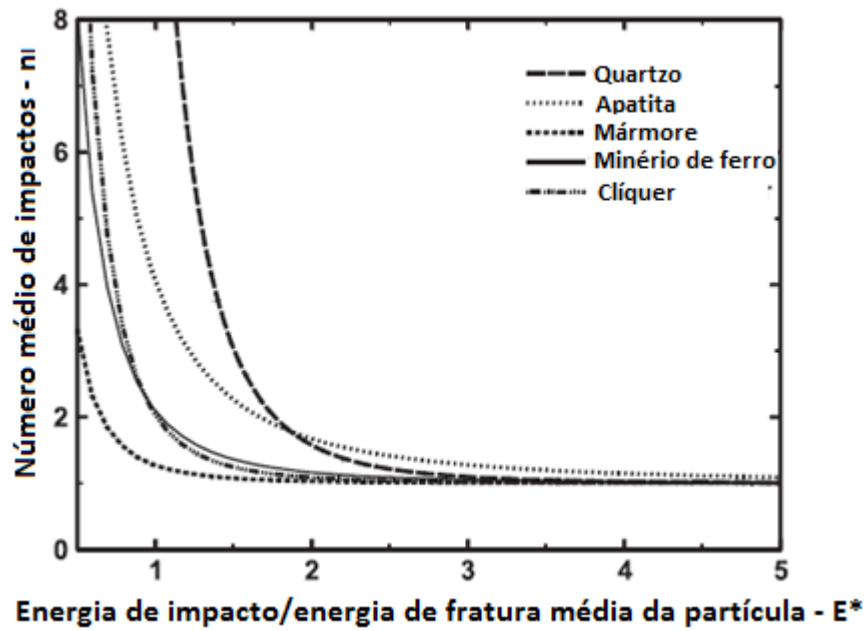


Figura 2.13 - Relação entre o número total de impactos necessários para a quebra de partículas individuais e a energia relativa de impacto (Tavares, 2004)

Para caso particular da razão entre a energia de impacto e a energia média de fratura E^* se mantiver constante e a variância da distribuição de energia de fratura não variar com o tamanho, a Equação 2.11 se torna:

$$E_t = \frac{n_I E^*}{B_{11}} \sum_{j=1}^N (1 - P_j^{(j-1)}) E'_{50j} \quad (2.13)$$

A partir dessas informações foi possível aplicar o procedimento de simulação descrito.

O efeito da magnitude dos impactos na energia necessária para atingir a distribuição granulométrica do produto foi calculado e os resultados são mostrados na Figura 2.14.

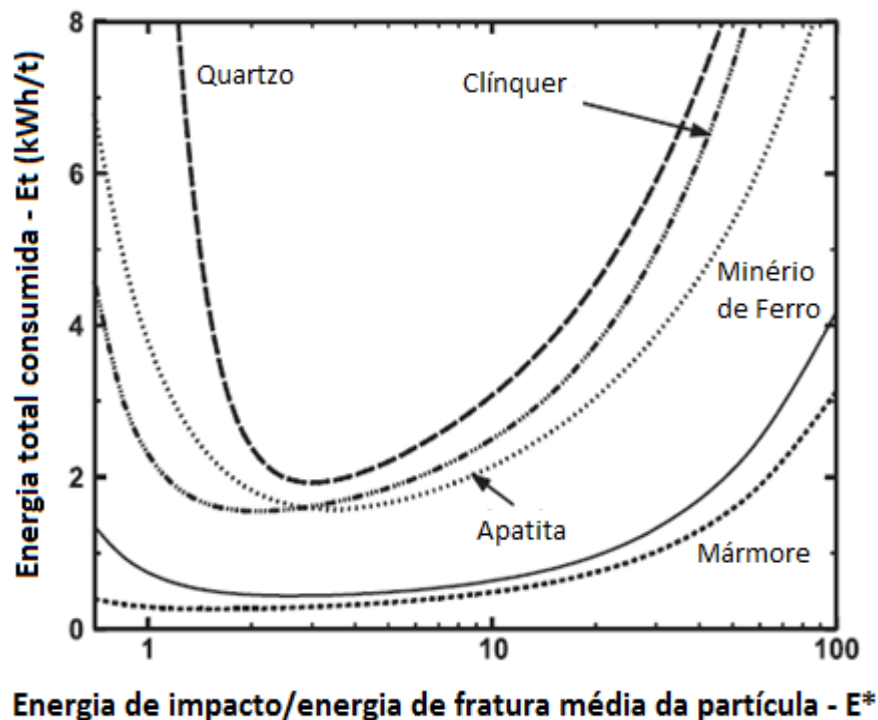


Figura 2.14 - Efeito da energia relativa de impacto na energia total consumida para obter um produto 100 % passante em 0,3 mm a partir de uma alimentação dada por $P_i^{(0)} = (D_i/8)^{0,4}$ (Tavares, 2004)

O aumento do consumo energético quando baixas energias relativas de impacto são empregadas se deve à baixa probabilidade de fratura das partículas. O comportamento da curva nessa parte depende da suscetibilidade do material à fratura por impactos repetitivos, demonstrado na Figura 2.13. Por outro lado, o aumento do consumo energético a altas energias relativas de impacto E^* se deve às perdas por atrito e à aglomeração dos fragmentos. A partir da Figura 2.14, pode-se notar que o menor consumo energético ocorre para energias relativas de impacto entre 1,5 e 4.

Esse método foi utilizado na avaliação da eficiência de moinhos de bolas, resultando em uma estimativa de, aproximadamente, 30%.

Segundo Tavares (2004), a ineficiência de moinhos, quando comparada à fratura de partículas individuais está associada ao fato de que em moinhos industriais não há garantia de que todas as colisões irão resultar em fratura de partículas, além de não ser possível controlar precisamente a energia de impacto que cada partícula estará sujeita. Além disso, nenhum classificador industrial é perfeito, resultando em recirculação de parte do material fino e, conseqüentemente, à deterioração do desempenho do circuito.

O estudo mostrou que a energia mínima consumida na cominuição é alcançada com a aplicação de impactos que produzem poucos eventos de fragmentação em cada evento e conseqüentemente baixa produção de finos.

2.4.2.5 Método de Avaliação da Eco-eficiência

De acordo com Musa e Morrison (2008), uma análise mais ampla da eficiência energética dos processos de cominuição deve incluir não somente a energia elétrica diretamente demandada nos processos, como também a energia indireta. A partir das fontes de energia adotadas, podem-se estimar as emissões de gases de efeito estufa associadas direta ou indiretamente aos processos de cominuição.

- **Consumo de energia direta**

É a energia elétrica consumida pelos equipamentos de cominuição. Esta energia é a utilizada pelos engenheiros de processo para projetar circuitos de cominuição. Uma tolerância de 5% é geralmente adicionada à potência do motor durante o projeto por causa das perdas. Este consumo pode ser calculado a partir da expressão:

$$E_{dir} = \frac{\sum_m P_m}{T} \quad (2.14)$$

onde P é a potência do moinho em kW e T o volume de produção em t/h.

- **Consumo de energia indireta**

Este é o consumo de energia dos equipamentos de manipulação e classificação e também da produção de corpos moedores e revestimentos consumidos na cominuição. A energia relacionada ao consumo de corpos moedores é calculada levando em conta a energia consumida em sua fabricação, sejam eles de metal ou de cerâmica, pela equação:

$$E_{ind} = \frac{\sum_m E_m * E_{aço} + \sum_m C_m * E_{cer}}{T} \quad (2.15)$$

onde E_m representa o consumo de aço no moinho em t, C_m o consumo de cerâmica no moinho em t, $E_{aço}$ a energia necessária para produzir 1 tonelada de aço em kWh e E_{cer} a energia necessária para produzir 1 tonelada de cerâmica em kWh.

A combinação das energias direta e indireta fornece uma maneira mais equilibrada de comparar diferentes processos e é calculada conforme equação:

$$E_t = E_{dir} + E_{ind} \quad (2.16)$$

A produção de gases de efeito estufa em tonelada de CO₂ pode ser estimada através da equação:

$$GEE = E * FE \quad (2.17)$$

Onde E representa a energia consumida na fabricação do material, em kWh e FE o fator de emissão em tonelada de CO₂ emitida /kWh.

- **Estudos de casos**

A Figura 2.15 ilustra um circuito típico de cominuição, mostrando os processos que foram levados em conta na avaliação da eco-eficiência.

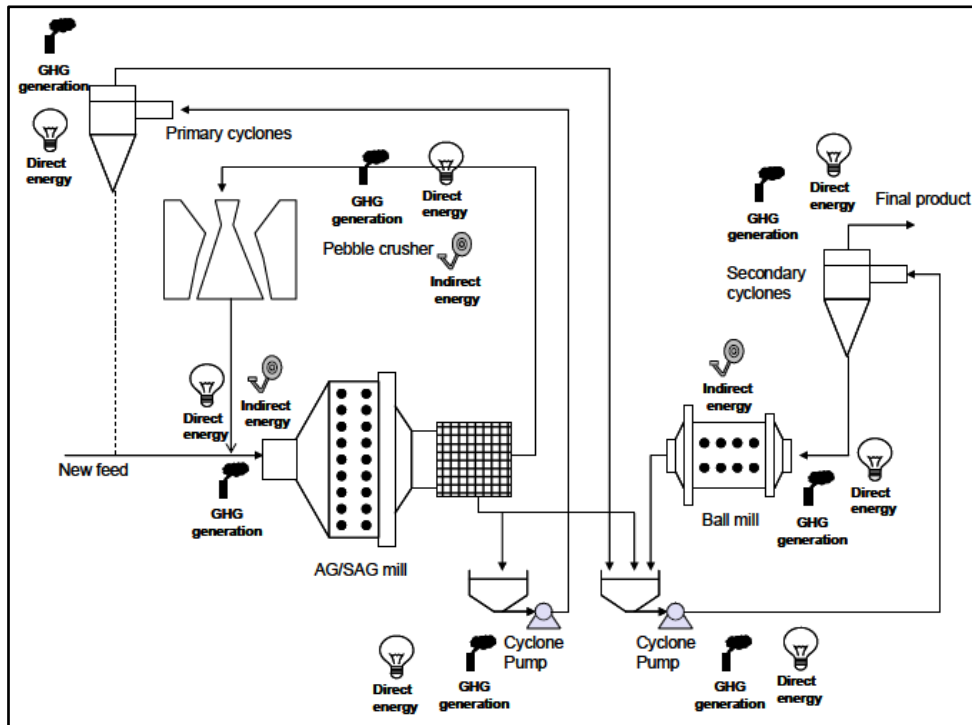


Figura 2.15 - Circuito típico de cominuição mostrando a entrada de energia direta, a entrada de energia indireta e as emissões de gases do efeito estufa (Musa e Morrison, 2008)

Uma comparação entre o consumo energético do moinho de bolas e do moinho atritor IsaMill foi realizada em escala industrial pela mina de ouro Kumtor em 2005. Utilizando os dados do circuito de cominuição de Kumtor e as equações 2.14 e 2.15, as energias direta e indireta foram calculadas e estão apresentadas na Figura 2.16. Nota-se em geral uma diminuição de quase 15% da energia direta e quase 40% da energia indireta consumida, ao substituir o moinho de bolas pelo moinho IsaMill. A vantagem em utilizar o moinho IsaMill é evidente devido ao uso de corpos moedores inertes feitos de cerâmica. Isso elimina a energia adicional necessária para a fabricação de bolas de aço, utilizadas nos moinhos de bolas.

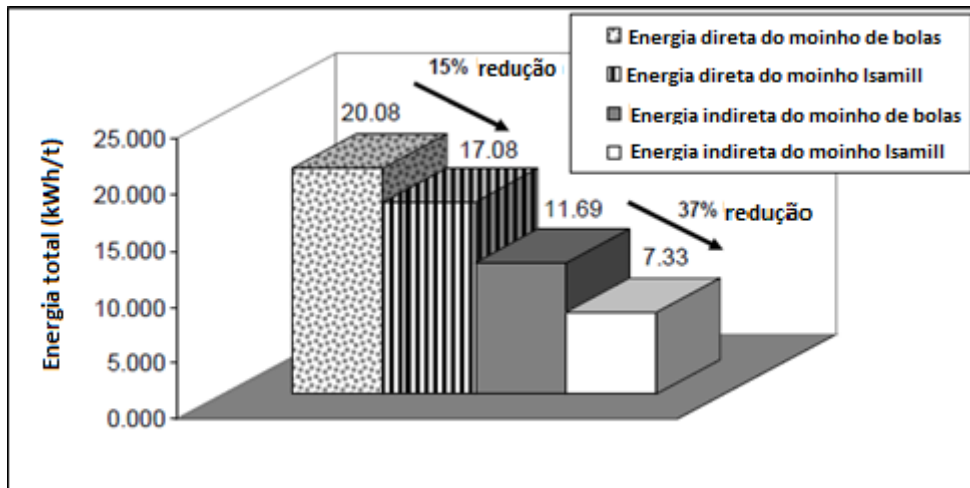


Figura 2.16 - Energia direta e indireta consumida no circuito de cominuição em Kumtor (Musa e Morrison, 2008)

Utilizando os valores de energia direta, energia indireta e um fator de emissão atômica (0,00106 para o Quirguistão) (SEPS, 2007), a geração de CO₂, devido ao consumo dessas energias, foi calculada através da equação 2.17 e os resultados são apresentados na Figura 2.17. De forma semelhante ao consumo energético, o efeito estufa gerado a partir do moinho de bolas foi maior do que o gerado pelo moinho IsaMill.

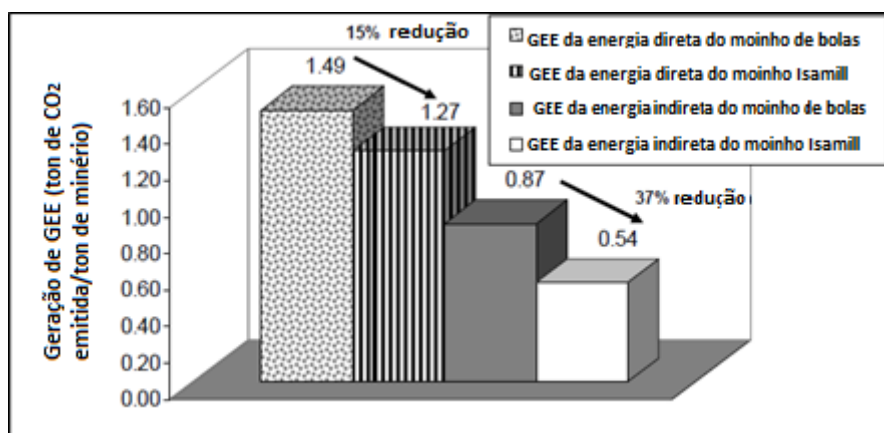


Figura 2.17 - GEE gerados a partir da energia total direta e indireta consumida no circuito de moagem de Kumtor (Musa e Morrison, 2008)

Os resultados da avaliação da eco-eficiência do circuito de cominuição de Kumtor estão resumidos na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Avaliação da eco-eficiência do circuito de cominuição de Kumtor (Musa e Morrison, 2008)

Tipo de Impacto	Moinho de Bolas	IsaMill	Diferença (%)
Energia Direta Total (kWh/t)	20,08	17,08	14,90
Energia Indireta Total (kWh/t)	11,69	7,33	37,30
Somatório	31,77	24,42	23,20
Gases do Efeito Estufa gerados com a energia direta (t-CO₂/kWh)	1,49	1,27	14,90
Gases do Efeito Estufa gerados com a energia indireta (t-CO₂/kWh)	0,87	0,53	37,30

3. Estudo de Caso

Esta etapa do trabalho consiste de um estudo de caso, realizado com o intuito de comparar os resultados obtidos com os diferentes métodos utilizados para o cálculo da eficiência energética de um circuito de cominuição industrial, evidenciando a eco-eficiência deste mesmo circuito, isto é, levando em consideração o desgaste sofrido pelos corpos moedores e revestimentos dos equipamentos.

Nesse sentido, dois circuitos industriais foram estudados. O primeiro deles consiste em um circuito de britagem, operado pela Pedra Sul Mineração Ltda desde 1999, localizado em Matias Barbosa, Minas Gerais. O segundo, em um circuito de moagem da Mina de Sossego, operado pela Vale, a aproximadamente 70 km de Carajás, próximo à cidade de Canaã dos Carajás, no Pará.

3.1 Premissas

3.1.1 Caracterização dos Materiais

Os materiais processados no circuito de britagem e de moagem são, respectivamente, brita e minério de cobre.

A Figura 3.1 ilustra a variação das energias de fratura médias (E_{m50}) medidas e estimadas em função do tamanho de partícula para a brita e o minério de cobre. Pode-se notar pelo gráfico que em todos os casos a energia de fratura média aumenta conforme o tamanho da partícula diminui.

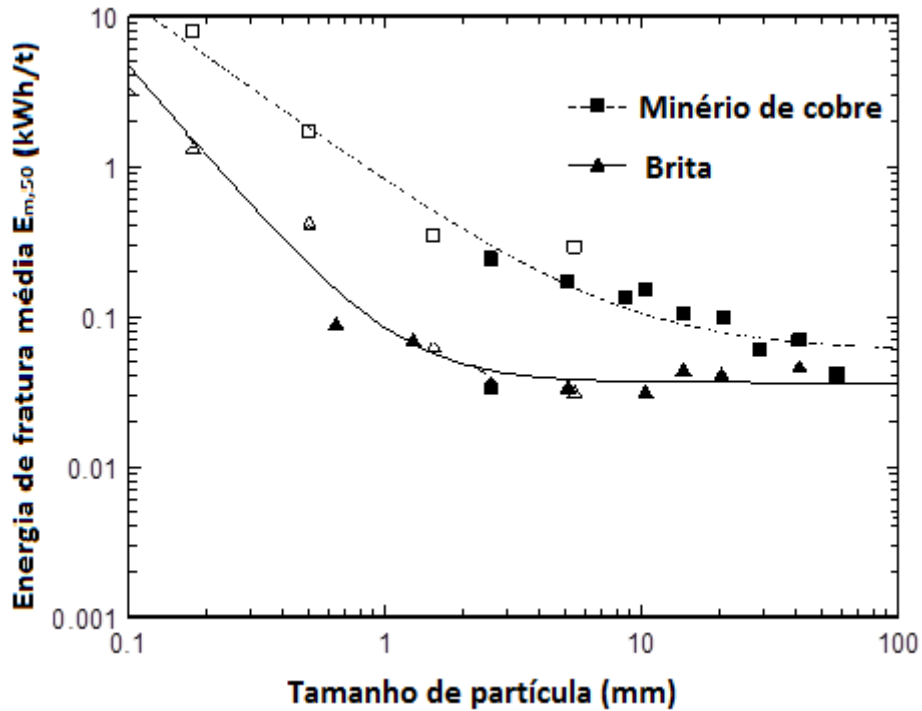


Figura 3.1 - Energias de fratura médias (E_{m50}) medidas (símbolo preenchido) e estimadas (símbolo vazio) em função do tamanho de partícula para os minérios estudados (Barrios e tal., 2011)

Os parâmetros de ambos os circuitos são apresentados na Tabela 3.1. De acordo com as classificações dos valores de *Work Index* (W_i) ou índice de trabalho do material e do índice de abrasividade de Bond (A_i) das Tabelas 3.2 e 3.3 respectivamente, a brita possui um elevado valor de W_i e um médio índice de abrasividade. Já o minério do Circuito de Sossego, um granito com presença significativa de magnetita, possui um valor de W_i maior do que a brita, sendo também classificado como alto, além de possuir um moderadamente alto índice de abrasividade. Os parâmetros α e β são usados para descrever a função quebra de partículas individuais (Barrios *et al.*, 2011).

Tabela 3.1 – Parâmetros do circuito da Pedra Sul Mineração e da Mina de Sossego (Barrios *et al.*, 2011)

Parâmetro	Brita	Cobre
Wi (kWh/t)	15,2	17,3
$\alpha_{1,2}/\beta_{1,2}$	0,433/10,26	0,505/11,95
$\alpha_{1,5}/\beta_{1,5}$	0,915/10,74	1,066/13,87
α_2/β_2	1,312/9,148	1,014/8,088
α_4/β_4	1,182/2,974	1,084/3,027
α_{25}/β_{25}	0,927/0,492	1,012/0,527
α_{50}/β_{50}	0,922/0,389	1,026/0,363
α_{75}/β_{75}	9,903/0,303	1,0343/0,295
A (%)	47,52	67,71
b'	0,0273	0,0294
E_{∞} (kWh/t)	0,0363	0,0593
D_0 (mm)	1,143	8,073
ϕ	1,994	1,219
σ_{∞}	0,902	0,608
Ai (g)	0,24	0,50

Tabela 3.2 – Classificação dos valores de *Work Index* (Napier-Munn *et. al.*, 1999)

Valor de Wi (kWh/t)	Classificação (resistência à moagem)
7 - 9	Baixa
9 - 14	Média
14 - 20	Alta
> 20	Muito alta

Tabela 3.3 – Classificação da Abrasividade segundo o parâmetro Ai (Tavares, 2009)

Intervalo de Valores do Parâmetro Ai	Abrasividade
0 - 0,10	Baixa
0,11 - 0,20	Moderadamente baixa
0,21 - 0,35	Média
0,36 - 0,55	Moderadamente alta
0,56	Alta

O Índice de Abrasividade de Bond é necessário para determinação da taxa de desgaste do revestimento dos britadores, conforme demonstrado na Tabela 3.4, com base em Chaves *et. al.* (2003). Diferenças significativas podem ser obtidas durante a manutenção do equipamento dependendo da abrasividade do minério.

Tabela 3.4 - Fórmulas para determinação da taxa de desgaste em função do índice de abrasão (g/kWh) (Chaves *et. al.*, 2003)

Equipamento	Peça de Desgaste	Fórmula
Britadores	Revestimento	$q = 41,23 * (Ai + 0,22)$

Notas: 1 – As fórmulas se aplicam para $0,02 < Ai < 0,8$.

2 – Foi considerado como material de desgaste o aço hadfield.

3.1.2 Fluxogramas

3.1.2.1 Pedra Sul Mineração

Com capacidade nominal de 455 t/h, a produção de brita da Pedra Sul Mineração é composta por um circuito com quatro estágios de britagem. O fluxograma do circuito pode ser observado na Figura 3.2. O primeiro estágio de britagem é realizado com um britador de mandíbulas 1208 HD de fabricação da Sandvik, o segundo com um britador giratório S3000 e os dois subsequentes com britadores hidrocônicos H4000 e H3000. Após a britagem o material é peneirado com três peneiras para classificação e uma para seleção e limpeza. O circuito completo inclui britadores, compressor, peneiras,

alimentadores e transportadores de correia e sua potência nominal instalada é de 1.040 kW (Neves e Tavares, 2004). A listagem dos principais equipamentos do circuito, a partir da britagem secundária, seus respectivos modelos, fabricantes e potências encontra-se na Tabela 3.5. Foram considerados equipamentos acessórios os alimentadores, peneiras e correias transportadoras.

O produto final é classificado quanto a granulometria em brita 0, brita 1, brita 2 e pó de pedra. A brita zero possui aplicação em revestimento de lajes pré-moldadas e em concreto, a brita 1 é utilizada em concreto para construção civil, confecção de estacas pré-moldadas para fundações, drenos e confecção de brita graduada para base de pistas, a brita 2 é utilizada como concreto de fundações, concreto para pisos e formas de grandes dimensões e o pó de pedra em blocos de cimento para alvenaria e confecção de asfalto.

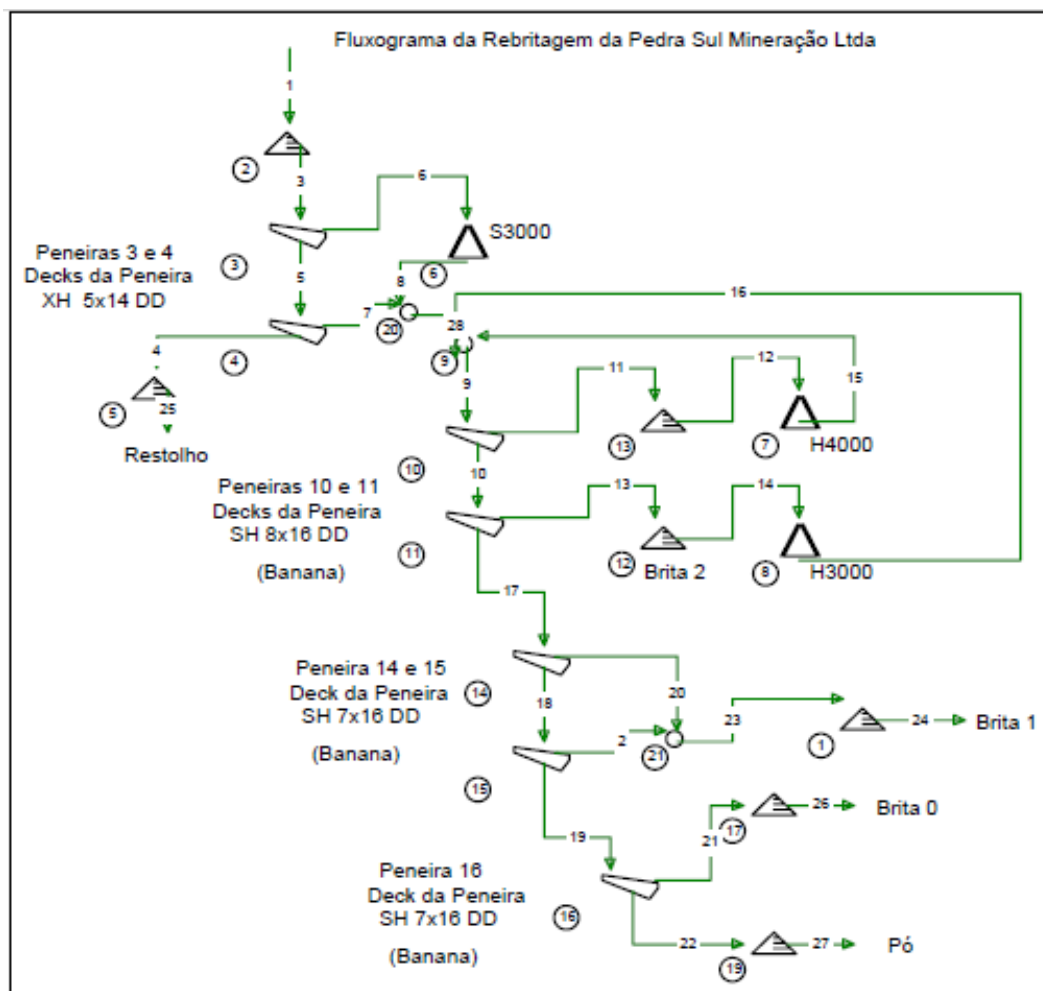


Figura 3.2 - Fluxograma do circuito da Pedra Sul Mineração (Neves, 2002)

Tabela 3.5 – Dados dos equipamentos do circuito da Pedra Sul Mineração

Circuito da Pedra Sul					
Equipamento	Modelo	Fabricante	Número	Potência Nominal (kW)	Potência em Operação (kW)
Britador Giratório	S3000	Svedala	1	149	72
Britador Hidrocônico	H4000	Svedala	1	223	181
Britador Hidrocônico	H3000	Svedala	1	149	79
Equipamentos Acessórios	-	-	-	369	184
Total	-	-	-	890	516

3.1.2.2 Mina de Sossego

De acordo com Bergerman *et al.* (2009), a Mina de Sossego foi a primeira usina da Vale a operar um moinho SAG para processar minério de cobre e ouro. O depósito foi descoberto em 1997 e compreende os corpos denominados Sossego e Sequeirinho. A operação da usina iniciou-se em 2004 e atualmente processa 41.000 t de minério por dia, lavradas a céu aberto, com um teor médio de 1,0% de cobre e 0,3 g/t de ouro.

O circuito de moagem, demonstrado na Figura 3.3, consiste de uma linha SABC, com capacidade nominal de 1.568 t/h. O produto da britagem primária, realizada por um britador giratório 6089, alimenta um moinho SAG. A descarga do SAG, por sua vez, alimenta uma peneira vibratória, cuja fração retida é encaminhada a uma britagem de seixos (*pebbles*), composta de um britador cônico. O circuito é fechado com o produto do rebitador retornando ao moinho SAG. A fração passante na peneira é bombeada para duas baterias de ciclones, cujo underflow reunido é encaminhado para dois moinhos de bolas. A listagem dos principais equipamentos do circuito, a partir do moinho SAG, seus respectivos modelos, fabricantes e potências encontram-se na Tabela 3.6.

Com o intuito de otimizar o consumo de energia da moagem, em 2006 foi realizada uma alteração no circuito. Com isso, o produto do rebitador foi encaminhado diretamente para os moinhos de bolas (Nankran *et al.* 2007).

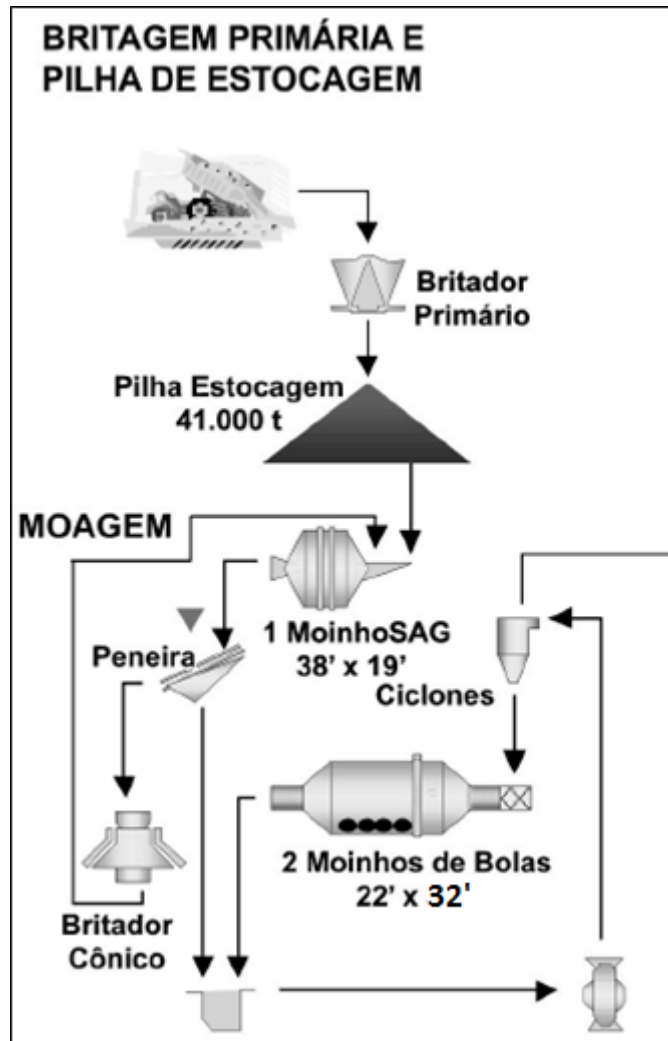


Figura 3.3 - Fluxograma da usina de Sossego (Bergerman *et al*, 2009)

Tabela 3.6 – Dados dos equipamentos do circuito da Mina de Sossego

Circuito de Sossego					
Equipamento	Modelo	Fabricante	Número	Potência Nominal (KW)	Potência em Operação (KW)
Moinho SAG de 38 X 23 ft	-	Metso	1	20.000	17.520
Britador Cônico	MP 800	Nordberg	1	596	157
Moinho de Bolas de 22' X 32'	-	Metso	2	8.500	16.644
Retomador da pilha de minério britado	Sapata	-	2	75	75
Transportador de correia para alimentação do SAG	-	-	1	110	55
Peneira vibratória	LH12X24DD	Metso	1	7,5	3,75
Transportador de correia 2301-TC-01	-	-	1	22	11
Transportador de correia 2301-TC-03	-	-	1	45	22,5
Transportador de correia 2301-TC-06	-	-	1	15	7,5
Transportador de correia 2301-TC-02	-	-	1	110	55
Transportador de correia 2301-TC-05	-	-	1	50	25
Transportador de correia 2301-TC-08	-	-	1	22	11
Transportador de correia 2301-TC-09	-	-	1	55	27,5
Transportador de correia 2301-TC-10	-	-	1	22	11
Bombas dos hidrociclones	FEMAQ ASH PUMP 550 MMC	-	1	1250	625
Total	-	-	-	-	35.250

3.1.3 Análises Granulométricas da Alimentação e do Produto

3.1.3.1 Pedra Sul Mineração

A Figura 3.4 representa a distribuição granulométrica do produto e da alimentação do circuito de britagem secundária da Pedra Sul Mineração. Ela mostra a relativamente modesta redução de tamanhos que ocorreu no circuito de britagem, correspondendo a uma razão de redução não superior a 6.

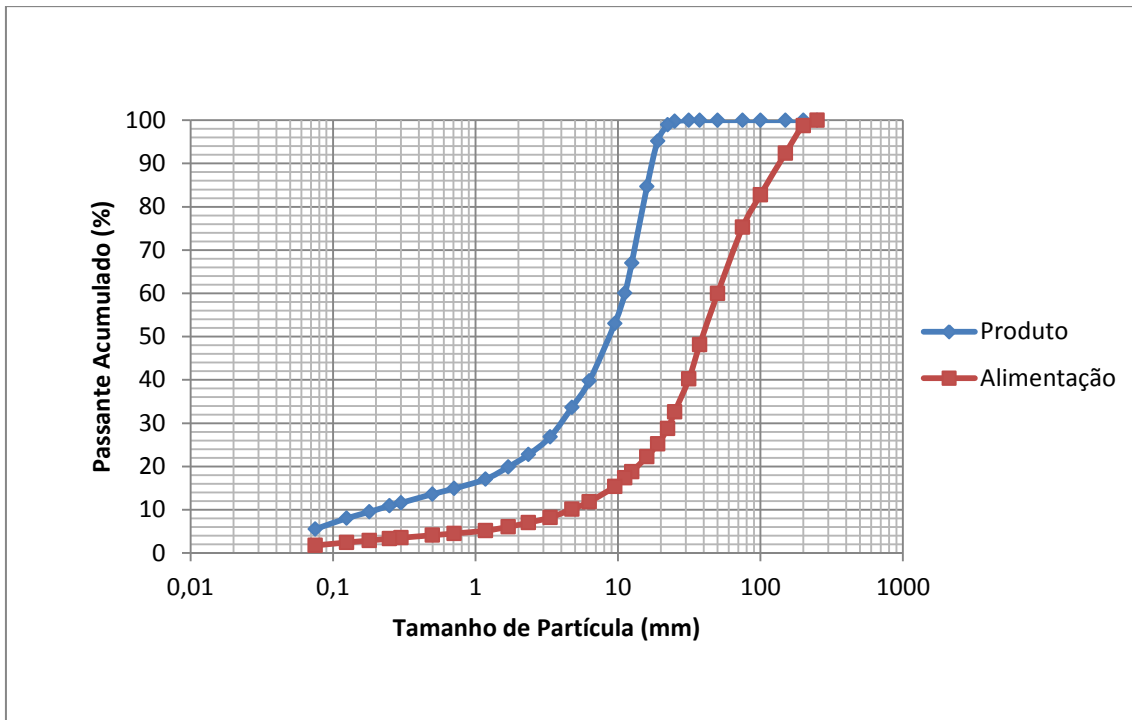


Figura 3.4 – Distribuição Granulométrica do Produto e da Alimentação do Circuito da Pedra Sul Mineração

3.1.3.2 Mina de Sossego

A Figura 3.5 representa a distribuição granulométrica do produto e da alimentação do circuito de moagem da Mina de Sossego. Observa-se, pela comparação com a Figura 3.4, que para o circuito do Sossego a razão de redução encontrada (da ordem de 1.000) foi bem mais elevada do que no caso anterior. Esta constatação era esperada, uma vez que no primeiro caso temos um circuito de britagem e no segundo, um circuito de moagem.

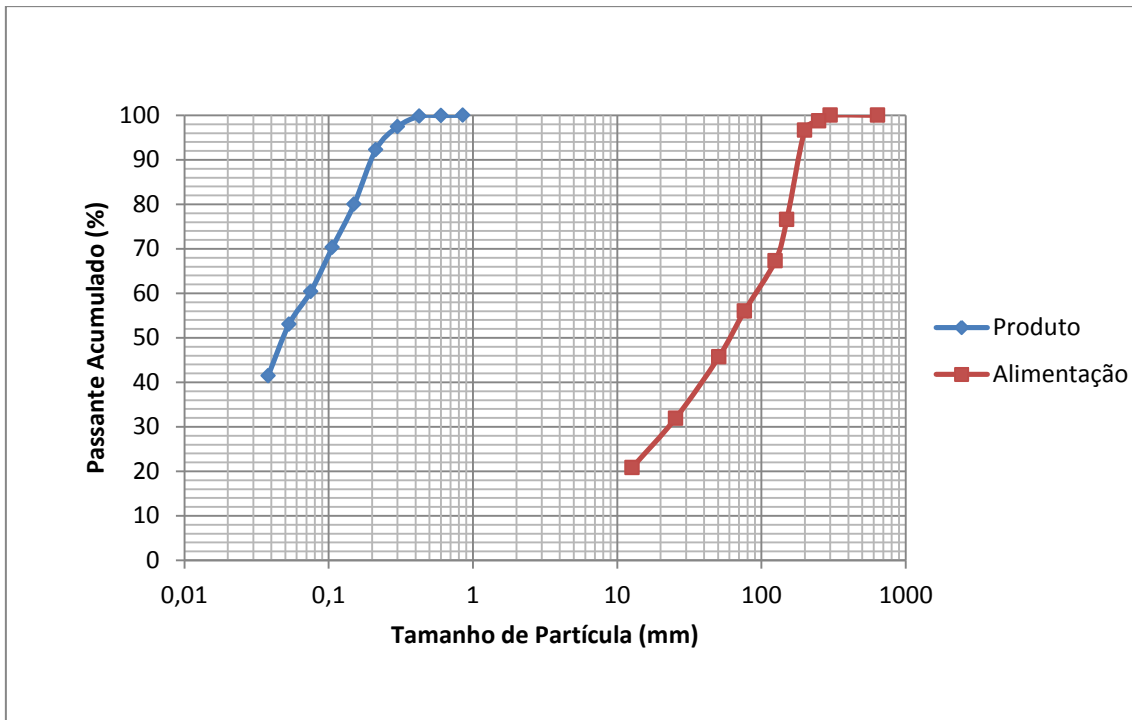


Figura 3.5 – Distribuição Granulométrica do Produto e da Alimentação do Circuito da Mina de Sossego

3.1.4 Consumo Energético Específico dos Circuitos Industriais

O consumo energético específico de cada equipamento, mostrado nas Tabelas 3.7 e 3.8 para os Circuitos Pedra Sul Mineração e Mina de Sossego, respectivamente, pode ser calculado através da relação:

$$\text{Consumo Específico} = \frac{W_{\text{equipamento}}}{Q_{\text{circuito}}}$$

Tabela 3.7 – Consumo energético específico do Circuito Pedra Sul Mineração

Circuito Pedra Sul Mineração			
Equipamento	Potência em operação (KW)	Taxa de Alimentação (t/h)	Consumo Energético Específico (KWh/t)
Britador Giratório	72	455	0,16
Britador Hidrocônico	181		0,40
Britador Hidrocônico	79		0,17
Equipamentos Acessórios	184		0,40

Tabela 3.8 – Consumo energético específico do Circuito Mina de Sossego

Circuito Mina de Sossego			
Equipamento	Potência em operação (KW)	Taxa de Alimentação (t/h)	Consumo Energético Específico (KWh/t)
Moinho SAG de 38 X 23 ft	17.520	1.568	11,18
Britador Cônico	157		0,10
Moinhos de Bolas de 22' X 32'	16.644		10,62
Equipamentos Acessórios	929		0,59

A Tabela 3.9 mostra uma comparação entre o consumo energético total, além dos valores de A80 e P80 de ambos os circuitos.

Tabela 3.9 - Consumo energético específico, A80 e P80 dos circuitos

Circuito	Consumo Energético Específico (kWh/t)	A80 (mm)	P80 (mm)
Pedra Sul Mineração	0,94	89,98	15,07
Mina de Sossego	22,49	157,58	0,15

Com base em Neves e Tavares (2004), o consumo energético global diário do circuito de britagem da Pedra Sul mineração é de 3.412 kWh. Considerando o fato do circuito possuir um turno diário de 8 horas e uma taxa de alimentação de 455 t/h, pode-se dizer que sua capacidade produtiva diária é de 3.640 t. Com isso, o consumo energético específico de todo o circuito será de 0,94 kWh/t. Já o consumo energético global do circuito de Sossego foi obtido pelo somatório do consumo energético de cada equipamento.

4. Resultados e Discussão

4.1 Consumo Energético Teórico

O consumo energético teórico, ou seja, o consumo ótimo para cada circuito foi encontrado utilizando o método de quebra de partículas individuais de Tavares (2004). Para isto, os modelos de Equações 2.5 a 2.13 foram implementados no *software* MatLab[®] R2010. Desta forma, simulações com diferentes energias relativas de impacto (E^*) podem ser realizadas.

Segundo Tavares (2004), a energia ótima consumida na cominuição de diferentes materiais foi atingida para energias relativas de impacto de 1,5 a 4. A partir desta informação e com os dados do circuito da Pedra Sul Mineração, as simulações foram realizadas para três razões de energia de impacto diferentes, incluindo $E^* = 2,1$. Como se pode observar na Figura 4.1, a energia total consumida mínima foi alcançada para uma energia relativa de impacto de 2,1.

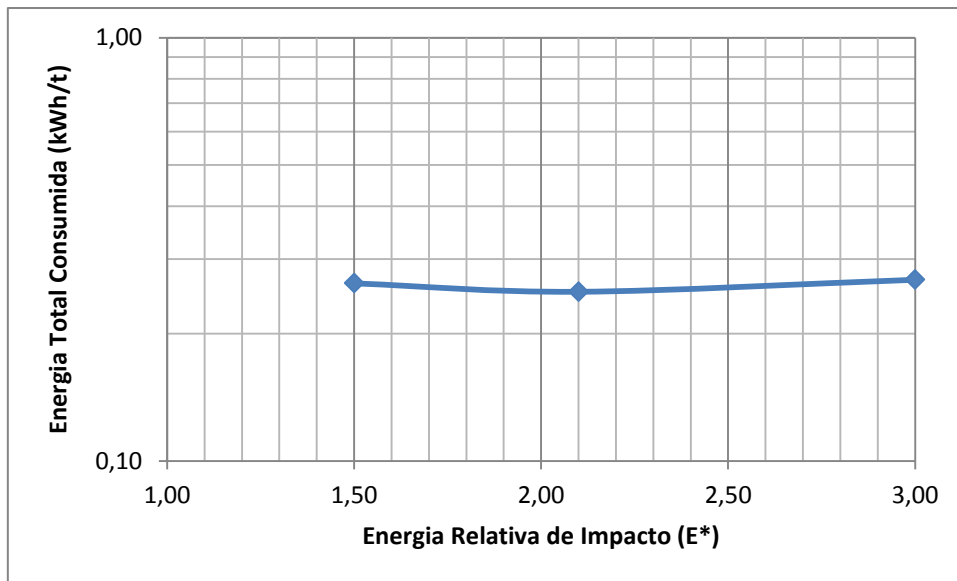


Figura 4.1 - Efeito da energia relativa de impacto na energia total consumida no Circuito Pedra Sul Mineração

Com os dados do circuito da Mina de Sossego, as simulações foram realizadas para onze razões de energia de impacto diferentes, incluindo $E^* = 2,1$. Como se pode observar na Figura 4.2, a energia total consumida mínima também foi alcançada para uma energia relativa de impacto de 2,1.

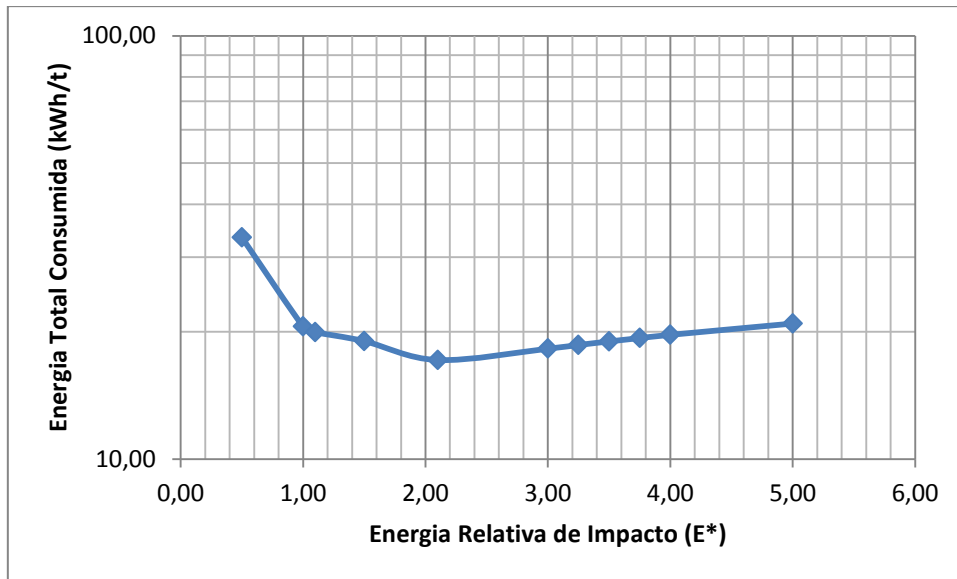


Figura 4.2 - Efeito da energia relativa de impacto na energia total consumida no Circuito Mina de Sossego

Serão mostrados agora os resultados obtidos com as simulações realizadas para a energia relativa de impacto de 2,1 para ambos os circuitos.

No circuito de britagem da Pedra Sul Mineração foram necessários onze ciclos de impactos (tendo em vista a divisão dos tamanhos em uma série com razão igual à raiz quadrada de 2) para atingir a distribuição granulométrica do produto desejada. Já no circuito de moagem da Mina de Sossego foram necessários vinte e dois ciclos de impactos. Antes de passarem para o próximo ciclo, as partículas de uma determinada classe de tamanhos sofreram o número de impactos necessários para a quebra de todas elas. As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram a evolução da granulometria ao longo dos ciclos de cominuição para os circuitos de britagem e de moagem respectivamente.

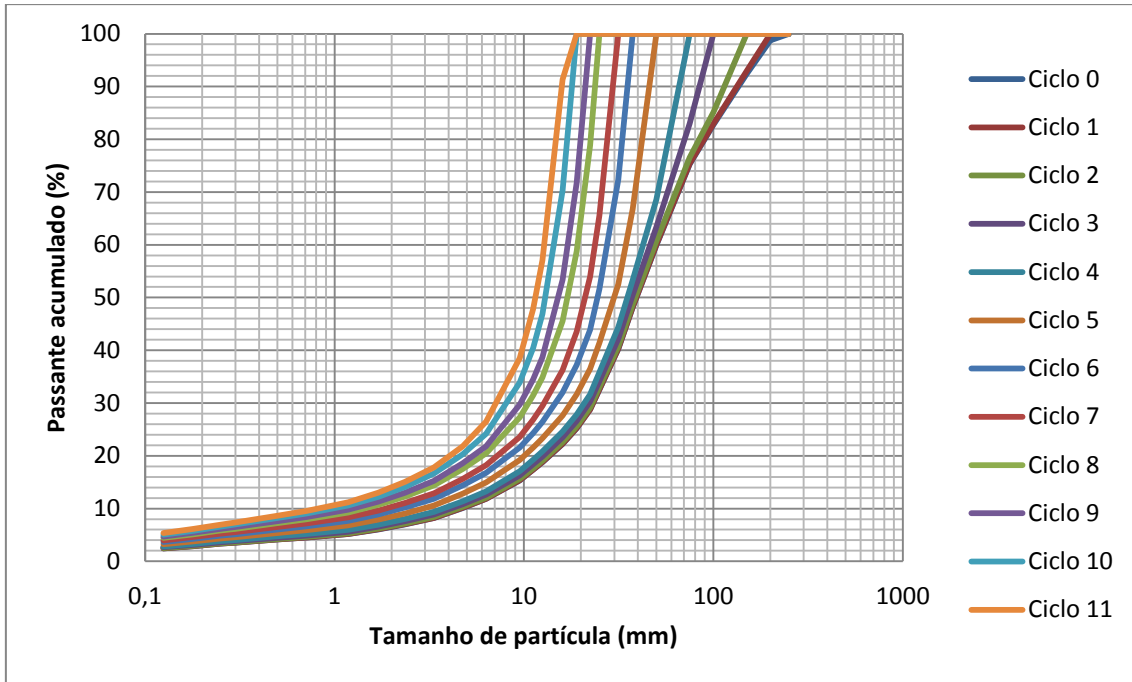


Figura 4.3 – Evolução da granulometria do Circuito Pedra Sul Mineração para $E^* = 2,1$

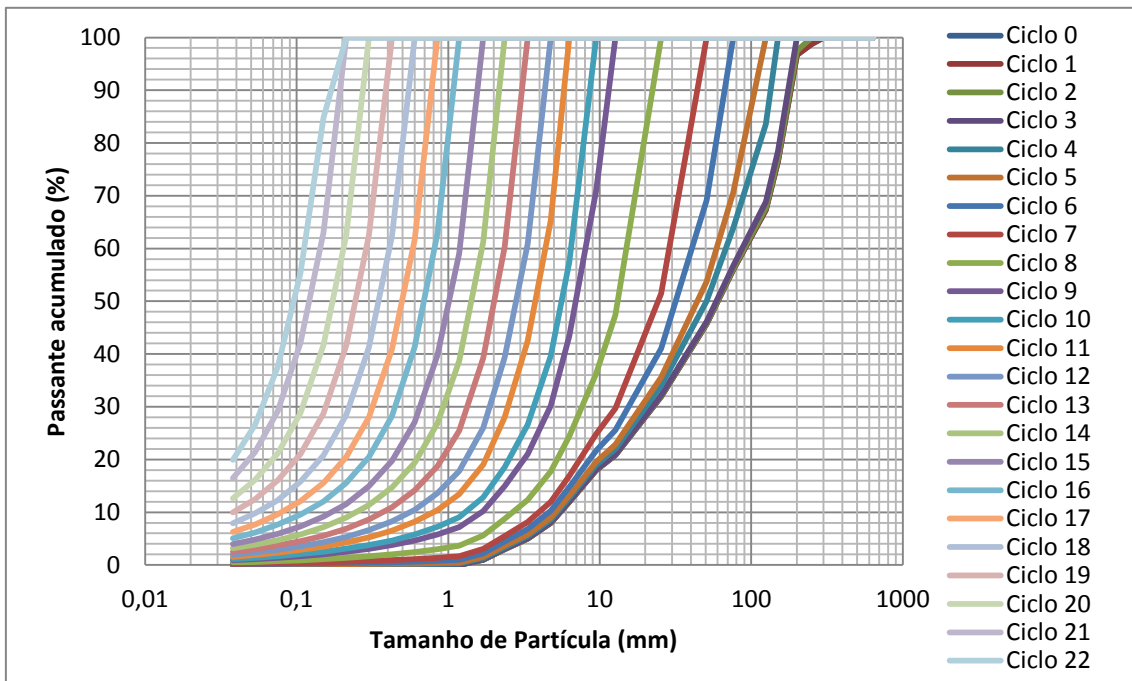


Figura 4.4 – Evolução da granulometria do Circuito Mina de Sossego para $E^* = 2,1$

Pode-se observar nas Figuras 4.5 e 4.6, uma comparação da distribuição granulométrica da alimentação e do produto com a distribuição granulométrica do produto simulado para os circuitos de britagem e de moagem respectivamente.

Analisando tais figuras, nota-se que em nenhum dos dois casos o produto simulado possui exatamente a mesma distribuição do produto real. No entanto, tanto o produto simulado como o real possuem o mesmo valor de P_{80} , valor este considerado pela indústria para efeito de cálculos.

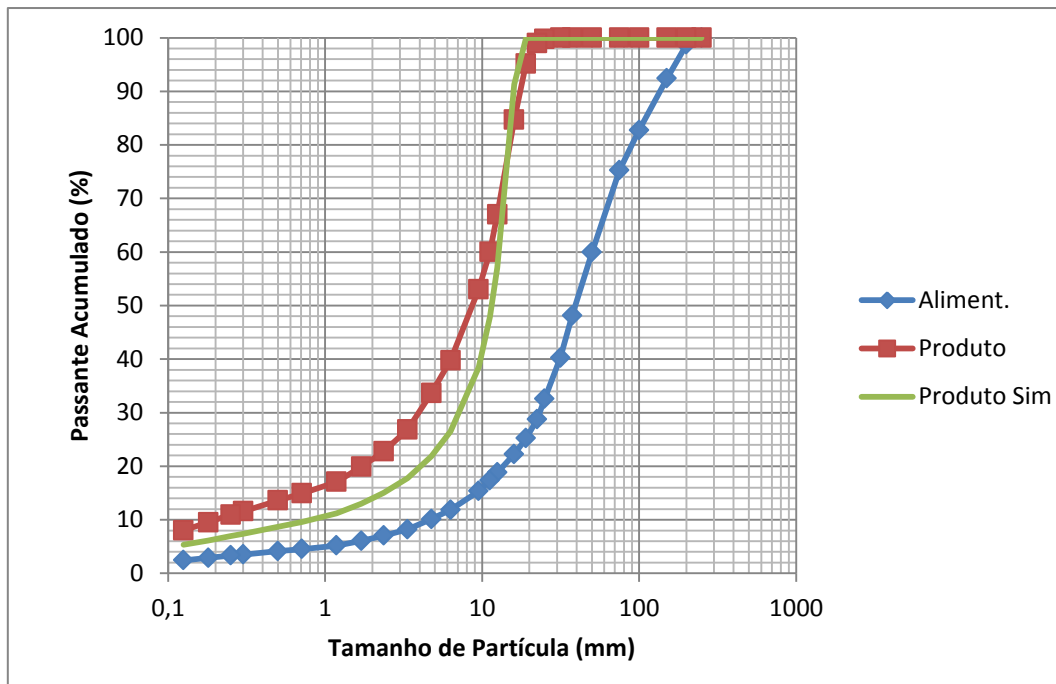


Figura 4.5 – Distribuição granulométrica da alimentação, do produto medido e do produto simulado do Circuito Pedra Sul Mineração para $E^* = 2,1$

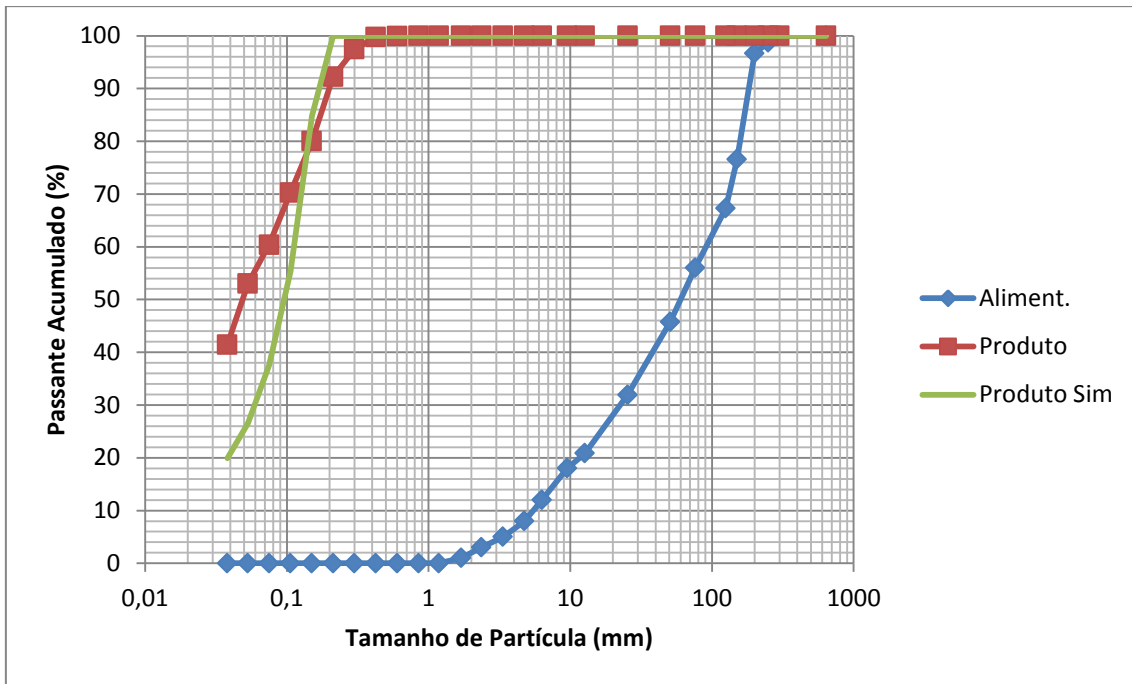


Figura 4.6 – Distribuição granulométrica da alimentação, do produto medido e do produto simulado do Circuito Mina de Sossego para $E^* = 2,1$

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram a energia acumulada em cada ciclo de fratura dos circuitos de britagem e de moagem, respectivamente. Com base em ambas as figuras, podemos dizer que a energia ótima consumida na quebra de partículas com tais características foi de 0,25 kWh/t para o circuito de britagem e de 17,13 kWh/t para o circuito de moagem.

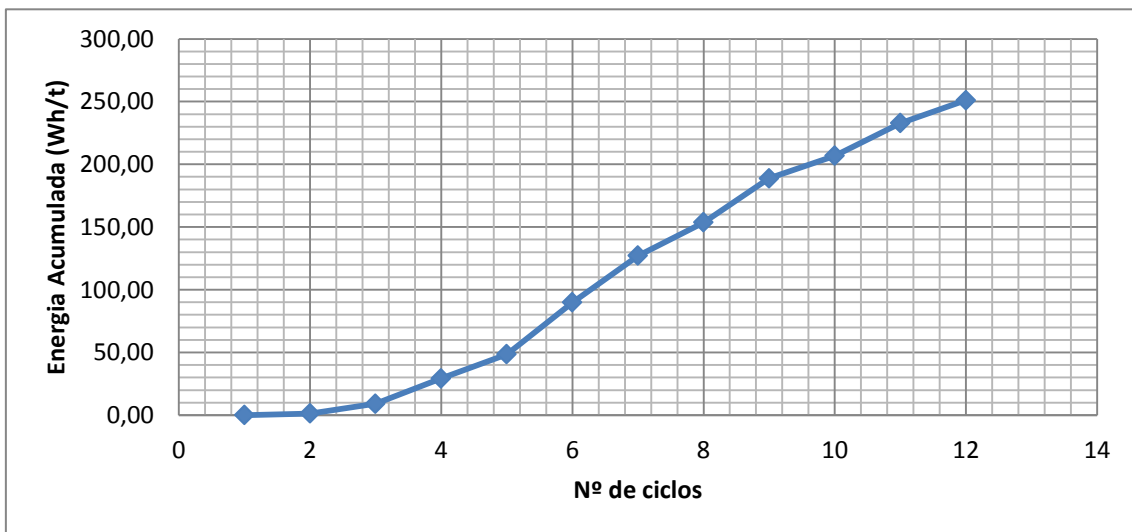


Figura 4.7 – Energia acumulada por ciclos do Circuito Pedra Sul Mineração para $E^* = 2,1$

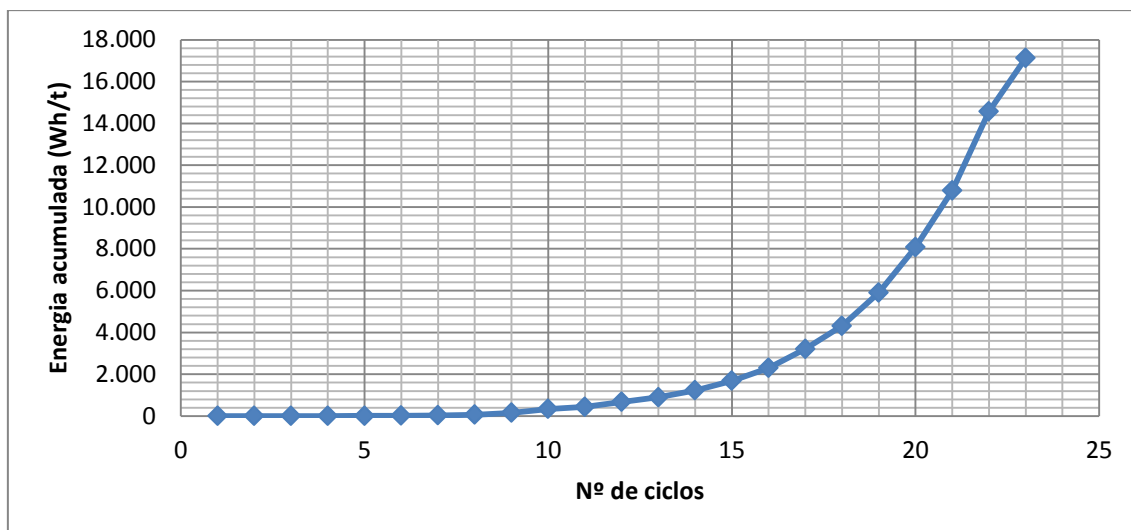


Figura 4.8 – Energia acumulada por ciclos do Circuito Mina de Sossego para $E^* = 2,1$

4.2 Eficiência Energética

Um dos métodos utilizados para o cálculo da eficiência energética é o Método do Índice de Trabalho Operacional de Bond. Este método é baseado na comparação do índice de trabalho do material com o índice de trabalho operacional, calculado pela Equação 2.2. As eficiências energéticas de ambos os circuitos, calculadas por este método, estão mostradas na Tabela 4.1.

Os resultados obtidos para eficiência energética de Bond estão de acordo com o esperado. Por se tratar de um circuito de britagem, o Circuito Pedra Sul Mineração obteve uma eficiência superior ao circuito de moagem da Mina de Sossego.

Tabela 4.1 – Eficiência energética dos circuitos pelo método de Bond

Circuito	W_i (kWh/t)	W_{io} (KWh/t)	Eficiência Energética de Bond (%)
Pedra Sul Mineração	15,20	19,53	77,8
Mina de Sossego	17,30	28,42	60,9

Outro método para o cálculo da eficiência energética é o Método de Tavares. Neste caso a energia total consumida na usina industrial, medida pelas potências dos equipamentos, é comparada com a energia necessária para a quebra de partículas individuais. Este consumo energético ótimo é alcançado variando as energias

específicas de impacto aplicadas em relação às energias específicas de fratura média das partículas. As eficiências energéticas de ambos os circuitos, calculadas por este método, estão mostradas na Tabela 4.2.

Os resultados obtidos para eficiência energética de ambos os circuitos são coerentes; no entanto, não eram esperados, uma vez que o circuito de moagem apresentou uma eficiência energética superior ao circuito de britagem.

Tabela 4.2 – Eficiência energética dos circuitos pelo método de Tavares

Circuito	Energia Teórica (kWh/t)	Energia Direta (kWh/t)	Eficiência Energética (%)
Pedra Sul Mineração	0,25	0,94	26,7
Mina de Sossego	17,13	22,49	76,2

4.3 Eco-eficiência Energética

A eco-eficiência energética leva em consideração o desgaste sofrido pelos corpos moedores e revestimento dos britadores e moinhos e a emissão de gases do efeito estufa no cálculo da eficiência energética. Isto significa que a eco-eficiência representa um resultado inferior e mais realista do que a eficiência calculada pelos outros métodos.

A taxa de desgaste dos britadores utilizados nos circuitos foi calculada pela equação da Tabela 3.4. Já a taxa de desgaste do revestimento e das bolas do moinho de bolas e do SAG foram obtidas de acordo com Projeto Sossego (2007). Com base em Padilha (2007), o consumo energético na produção de aço é de 20 GJ/t ou 5,55 Wh/g. Desta forma, calcula-se a energia associada à taxa de desgaste, ou seja, a energia indireta consumida nos circuitos de britagem e de moagem. Esta energia é mostrada nas Tabelas 4.3 e 4.4 para os circuitos Pedra Sul Mineração e Mina de Sossego, respectivamente.

Tabela 4.3 – Consumo energético indireto do circuito da Pedra Sul Mineração

Circuito Pedra Sul Mineração				
Equipamento	Índice de Abrasão (Ai)	Consumo Energético Específico (kWh/t)	Taxa de Desgaste do Revestimento (g/kWh)	Energia Indireta (kWh/t)
Britador Giratório	0,24	0,16	18,97	0,02
Britador Hidrocônico	0,24	0,40	18,97	0,04
Britador Hidrocônico	0,24	0,17	18,97	0,02

Tabela 4.4 – Consumo energético indireto do circuito da Mina de Sossego

Circuito Mina de Sossego					
Equipamento	Índice de Abrasão (Ai)	Consumo Energético Específico (KWh/t)	Taxa de Desgaste (g/kWh)		Energia Indireta (KWh/t)
			Revestimento	Bolas	
Britador Cônico	0,50	0,10	29,69	-	0,02
Moinho de Bolas	-	5,31	3,00	40,00	1,27
Moinho SAG	-	11,18	6,40	50,00	3,50

A eco-eficiência é então calculada comparando-se o consumo energético ótimo, obtido pelas simulações, com a soma do consumo energético direto, obtido pelas potências dos equipamentos, com o consumo energético indireto, obtido pela taxa de desgaste dos equipamentos. Esses resultados podem ser observados na Tabela 4.5 para ambos os circuitos estudados.

Tabela 4.5 – Eco-eficiência energética dos circuitos

Circuito	Energia Teórica (kWh/t)	Energia Direta (kWh/t)	Energia Indireta (kWh/t)	Energia Total (kWh/t)	Eco-eficiência Energética (%)
Pedra Sul Mineração	0,25	0,94	0,08	1,02	24,7
Mina de Sossego	17,13	22,49	4,78	27,27	62,8

Ainda com base na Tabela 4.5, pode-se dizer que a energia indireta representou 7,8% do consumo energético total do Circuito Pedra Sul Mineração e 17,5% do Circuito Mina de Sossego. Esta energia pode ser bastante diminuída ou até mesmo eliminada pela escolha de materiais mais resistentes para a fabricação do revestimento e corpos moedores dos equipamentos.

Além da energia associada à taxa de desgaste, a energia indireta é composta também pela emissão de gases do efeito estufa associada à fabricação dos materiais utilizados nos revestimentos e corpos moedores. Esta parcela não foi considerada nos cálculos da energia indireta dos circuitos de britagem e de moagem analisados, podendo ser tema de trabalhos futuros a partir dos resultados aqui propostos.

A eco-eficiência é um método importante para ser utilizado na obtenção da eficiência energética de circuitos industriais, uma vez que o consumo de energia indireta demonstrou ser uma parcela considerável da energia total consumida na cominuição.

Esta ferramenta auxilia na escolha do circuito de cominuição mais sustentável, dentre as alternativas possíveis, tendo em vista não só o custo, mas também o consumo de energia, o consumo de matéria-prima com o desgaste dos consumíveis, e a emissão de gases do efeito estufa.

5. Conclusão

Existem diversos métodos para o cálculo da eficiência energética de circuitos de cominuição. Dentre os cinco apresentados na revisão bibliográfica, três foram utilizados no cálculo da eficiência dos circuitos industriais de britagem da Pedra Sul Mineração e de moagem da Mina de Sossego, analisados no estudo de caso.

As eficiências energéticas obtidas através do Método de Bond foram de 77,8% e 60,9% para o circuito da Pedra Sul Mineração e da Mina de Sossego, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com o esperado, uma vez que o circuito de britagem obteve uma eficiência superior ao circuito de moagem.

Utilizando o Método de Tavares, as eficiências encontradas foram de 26,7% e 76,2% para o circuito da Pedra Sul Mineração e da Mina de Sossego, respectivamente. Neste caso, surpreendentemente o circuito de moagem obteve uma eficiência superior ao circuito de britagem. O resultado encontrado para a eficiência do circuito da Pedra Sul Mineração está de acordo com o esperado, no entanto, o resultado encontrado para o circuito da Mina de Sossego está muito superior ao esperado. Isto pode ser explicado pelo fato deste método depender muito dos dados de caracterização do minério. Neste caso, os mesmos podem ter sido superestimados para as partículas finas do minério de cobre, admitindo-se que tal minério possuía uma resistência superior à sua resistência real.

A eco-eficiência encontrada para a Pedra Sul Mineração foi de 24,7% e para a Mina de Sossego de 62,8%. A partir desses resultados, pode-se observar que os mesmos são inferiores e mais realistas do que os encontrados pelo Método de Tavares, uma vez que a energia indireta foi incorporada no cálculo da eco-eficiência.

Com base nos resultados obtidos, pode-se notar também uma grande variação entre eles, quando comparados entre si. Para o circuito da Pedra Sul Mineração a variação entre os resultados encontrados com o Método do Índice de Trabalho Operacional de Bond e o Método de Tavares chegou a 51,1% de eficiência energética, enquanto que no circuito da Mina de Sossego a diferença chegou a 15,3%.

Baseando-se nas eficiências energéticas obtidas, pode-se observar também que existe um potencial ainda muito grande para melhorias nos circuitos de cominuição, seja pelo uso de equipamentos energeticamente mais eficientes ou pela escolha da melhor rota a ser utilizada para determinada situação.

A busca por reduções no consumo de energia elétrica, de insumos minerais e a consequente redução de perdas nos circuitos industriais é essencial, pois possibilita o uso de recursos minerais em bases mais sustentáveis.

6. Referências Bibliográficas

- ABREU, C., *Sustentabilidade Industrial: Aplicando Sustentabilidade na Indústria*, 2010a. Disponível em: <<http://www.atitudessustentaveis.com.br/sustentabilidade/sustentabilidade-industrial-aplicando-sustentabilidade-industria/>>. Acesso em: 10/01/2011.
- ABREU, C., *Sustentabilidade Industrial: Aplicando Sustentabilidade na Indústria*, 2010b. Disponível em: <<http://www.atitudessustentaveis.com.br/sustentabilidade/creditos-de-carbono-entendendo-a-moeda-verde/>>. Acesso em: 10/01/2011.
- ANDERSEN, J., NAPIER-MUNN, T.J., “Power Prediction for Cone Crushers”, *Third Mill Operators Conference, Cobar, NSW, Austrália*, 1988.
- BARRETO, M. L., *Mineração e Desenvolvimento Sustentável: Desafios para o Brasil*. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2002.
- BARRETO, M. L., *Ensaio sobre a Sustentabilidade da Mineração no Brasil*. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2001.
- BARRIOS, G. K. P., DE CARVALHO, R. M., TAVARES L. M., “Extending Breakage Characterisation to Fine Sizes by Impact on Particle Beds”, *Transactions of the Institute of Materials, Minerals and Mining*, 2011.
- BERGERMAN, M., DELBONI, H., NANKRAN, M., “Mineração, Estudo de Variabilidade e Otimização do Circuito de Moagem SAG da Usina do Sossego”, *Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, pp. 93-97, 2009.
- BOND, F.C., The third theory of comminution, *Transactions AIME*, vol. 193, pp. 484-494, 1952.
- CALAES, G.D., *Planejamento Estratégico, Competitividade e Sustentabilidade na indústria Mineral: Dois casos de Não Metálicos no Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, CETEM/MCT/CNPq, CYTED, 2006.
- CHAVES, A.P. et al., *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios*, 2003.
- CORAZZA, R., I., “Tecnologia e Meio Ambiente”, *Artigo sobre o debate acerca dos limites do crescimento e das relações entre tecnologia e meio ambiente*, 2005.

Disponível em: <http://www.anpec.org.br/revista/vol6/vol6n2p435_461.pdf>. Acesso em: 04/02/2011.

CORDER, G.D., MCLELLAN, B.C., GREEN, S., "Incorporating Sustainable Development Principles into Minerals Processing Design and Operation: SUSOP®". In: *Minerals Engineering*, 2009.

DA COSTA, M.M., *Princípios de Ecologia Industrial aplicados à Sustentabilidade Ambiental e aos Sistemas de Produção de Aço*. Tese de Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2002.

DELBONI, H., "Cominuição", *Tendências Tecnológicas Brasil*, capítulo 2, 2007.

DIAS, G. F., *Educação Ambiental, Princípios e Práticas*, 1993.

FARIAS, C. E. G., "Mineração e Meio Ambiente no Brasil", *Relatório Preparado para o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD)*, 2002. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo011_02.pdf>. Acesso em: 26/01/2011.

GREENCO. Disponível em: <http://greencopecas.com.br/portal/index.php?option=com_k2&view=item&id=1:oque-%C3%A9-efeito-estufa?&Itemid=169>. Acesso em: 06/10/2010.

HERBST, J. A., "Comminution and Energy Conservation", *Department of Energy, National Materials Advisory Board, Committee on Comminution and Energy Consumption, National Academic Press*, Washington, D. C., 1981.

LA NAUZE, R.D., TEMOS, J., "Technologies for Sustainable Operation", *CMMI Congress*, Cairns, Queensland, Austrália, pp. 27-34, 2002.

LUZ, A.B., SAMPAIO, J. A., ALMEIDA, S. L. M., *Tratamento de Minérios*. 4 ed. Rio de Janeiro, CETEM/MTC, 2004.

MEADOWS, D. L., MEADOWS, D. H., RANDERS, J., *et al.*, *Limites do crescimento - um relatório para o Projeto do Clube de Roma sobre o dilema da humanidade*. São Paulo, Editora Perspectiva, 1972.

MICHAUX, S.P., *Analysis of Fines Generation in Blasting*. PhD Thesis, The University of Queensland, Australia, 2005.

Ministério de Minas e Energia. Disponível em:
<http://www.pormin.gov.br/biblioteca/arquivo/beneficiamento_de_minerio.pdf>.

Acesso em: 26/01/2011.

MUSA, F., MORRISON, R., “A More Sustainable Approach to Assessing Comminution Efficiency”, *Anais Comminution*, Fallmouth, pp. 1-18, 2008.

MUSA, F., MORRISON, R. D., Assessing Comminution Efficiency, *VII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology*, Brasil, 2007.

NANKRAN, M., BERGERMAN, M., FONSECA, R. *et al.*, “Abertura do Circuito de Moagem da Usina do Sossego”, *Encontro Nacional de Tratamento de Minérios*, Ouro Preto, Brasil, 2007.

NAPIER-MUNN, T.J. *et al.*, “Mineral Comminution Circuits: their Operation and Optimization”, *JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing*, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1999.

NEVES, P.B., *Otimização do Processo de Produção de Brita utilizando a Técnica de Simulação Computacional*. Projeto Final de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rio de Janeiro, 2002.

NEVES, P.B.; TAVARES, L.M., “Racionalização do Uso de Energia na Britagem com auxílio de Simulação Computacional”, *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo. v.1, n.2, pp.53-58, 2004

PADILHA, A. F., *Materiais de Engenharia, Microestrutura e propriedades*, 2007.

PIMIENTO, E. V., “Indicadores de Sostenibilidad Y su Aplicación a las Empresas Mineras”, *Gestión y Ambiente*, Medellín, Colombia, n. 4, pp. 9-34, 2000.

Projeto Sossego: Dados Básicos e Critérios de Projeto, Gerência de Processo do Cobre, 2007.

KING, R. P., *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.

RADZISZEWSKI, P., “Exploring Total Media Wear”, *Minerals Engineering*, 15, p. 1073-1087, 2002.

ROSARIO, P., HALL, R., “A Structured Approach to the Evaluation of the Energy Requirements of HPGR and Sag Mill Circuits in Hard Ore Applications”, *Anais, Comminution*, Fallmouth, pp. 1-20, 2008.

SEPS - Sustainable Energy Support Program, *Visions of Sustainability - Baseline Calculation*, 2007.

SHI, F., KOJOVIC, T., “Validation of a Model for Impact Breakage Incorporating Particle Size Effect”, *Int. J. Miner. Process.* v. 82, n. 3, pp. 156 – 163, 2006.

SIGNORINI, P., 2007. Disponível em: <<http://scienceblogs.com.br/rastrodecarbono/2007/08/o-que-e-carbono-equivalente.php>>. Acesso em: 14/04/2011.

TAVARES, L.M.M., *Processamento de Recursos Minerais I*, 2009.

TAVARES, L.M.M., “Optimum Routes for Particles Breakage by Impact”, *Powder Technology*. 142 pp. 81-91, 2004.

TAVARES, L.M.M., KING, R. P., “Modeling of Particle Breakage by Repeated Impacts using Continuum Damage Mechanics”, *Powder Technol.* 123 pp. 138-146, 2002.

TAVARES, L. M., *Projeto de Circuitos de Cominuição de Minérios Usando Conceitos de Sustentabilidade e Eco-Eficiência Energética*, Edital MCT/CT-Mineral/CNPq n 56, 2008.

UNCED - United Nations Conference on Environment and Development, *The Encyclopedia of Earth*, Rio de Janeiro, Brasil, 1992.

UNITED NATIONS, *Report of the World Summit on Sustainable Development*, Johannesburg, South Africa, 2002. Disponível em: <http://www.johannesburgsummit.org/html/documents/summit_docs/131302_wssd_report_reissued.pdf>. Acesso em: 10/01/2011.

VILLAS-BÔAS, R. C., BEINHOFF, C., *Indicators of Sustainability for the Mineral Extraction Industries*, Carajás, Ed. Roberto C. Villas Bôas, 2002.

VOGEL, L., PEUKERT, W., “Determination of Material Properties Relevant to Grinding by Practicable Labscale Milling Tests”, *International Journal of Minerals Processing*, 2004.

VON RITTINGER, P.R., *Lehrbuch der Aufbereitungskunde*, Ernst and Korn, Berlin, 1867.

WALSTRA, C., CURRY, D.RULE, C., “What If We Already Know? Energy Efficient Concentrator Design”, *Anais, Comminution*, Fallmouth, pp. 1-21, 2008.

WIKIPEDIA. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Quito>. Acesso em: 20/04/2011.

WILLS, B. A., *Mineral Processing Technology*, 6 ed. Butterworth-Heinemann, 1997.