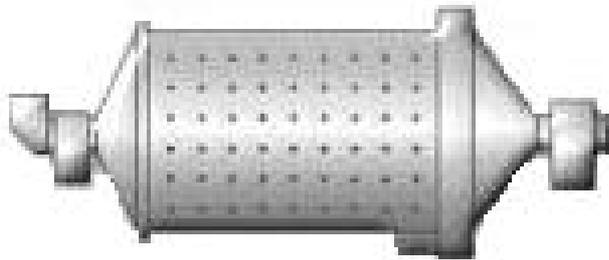




ENGENHARIA DA COMINUIÇÃO E MOAGEM EM MOINHOS TUBULARES



Por
ALEXIS P. YOVANOVIC

Engenheiro Civil Químico, U. del Norte, Chile, 1973
Autor do **Modelo Operacional** e Consultor Especialista em
Otimização e Controle de Processos Mineraiis, B. Horizonte/MG, Brasil





PRÓLOGO

A Evolução da Tecnologia Mineral e os Mitos Tecnológicos

El desarrollo técnico de cualquier operación unitaria puede dividirse en tres vertientes principales: la tecnología (fabricantes y empresas de ingeniería), la práctica (operadores) y la teoría (universidades y centros de investigación). En el área de tratamiento de minerales ellas son muy poco integradas entre sí. El gran vacío existente entre los fundamentos teóricos y la práctica industrial de estas operaciones ha sido llenado durante casi 100 años por la utilización de diversos “mitos tecnológicos” o paradigmas, suministrados por fabricantes de equipos, hoy agrupados en grandes bloques multinacionales de donde orientan el desarrollo tecnológico de estas operaciones a favor de sus propias conveniencias o estrategias de penetración de mercado, principalmente en aquellos países que carecen de cultura tecnológica nacional, o regional, como son los países latinoamericanos. Esos mitos corresponden a determinadas fórmulas empíricas, tablas indicadas en los catálogos de los fabricantes de equipos y “criterios de proyecto” tradicionalmente utilizados en la industria mineral, que se han constituido en paradigmas sin contestación y que han inhibido el desarrollo de nuevos abordajes científicos.

Pode-se separar em três vertentes principais o desenvolvimento técnico de qualquer operação unitária: a tecnologia (fabricantes e empresas de engenharia), a prática (operadores) e a teoria (universidades e centros de pesquisa). Na área de tratamento de minérios, elas são muito pouco integradas. O grande vazio existente entre os fundamentos teóricos e a prática industrial destas operações tem sido preenchido durante quase 100 anos pela utilização de diversos “mitos tecnológicos” ou paradigmas, fornecidos por fabricantes de equipamentos hoje agrupados em grandes blocos multinacionais de onde orientam o desenvolvimento tecnológico dessas operações em favor de suas próprias conveniências ou estratégias de penetração de mercado, principalmente naqueles países carentes de cultura tecnológica nacional, ou regional, como são os países latino-americanos. Esses mitos correspondem a determinadas fórmulas empíricas, tabelas indicadas nos manuais dos fabricantes de equipamentos e “critérios de projeto” tradicionalmente utilizados na indústria mineral, que se têm constituído em paradigmas sem contestação e que têm inibido o desenvolvimento de novas abordagens científicas.

A tecnologia deve ser analisada de forma política e econômica, associada ao mercado e às prioridades nacionais ou regionais. Até a década de 90, ainda existiam casos de avaliação de sistemas de cominuição onde a decisão de tecnologia era uma resultante da “cultura tecnológica” do país fornecedor destes sistemas; num mesmo projeto, consultores norte-americanos sugerem o sistema convencional (britagem e moagem em moinho de bolas); consultores suecos recomendam sistemas autógenos de pebbles; e consultores canadenses (os mais influentes no mercado latino-americano) concluem sistematicamente que a moagem semi-autógena é melhor. Cultura tecnológica nacional é o que Inglaterra fez ao mudar de lado o volante dos carros e o sentido do trânsito, garantindo a produção das suas indústrias e o mercado de venda dentro dos territórios sob a sua influência.

O século XXI começa com a formação de um único grupo mundial fabricante de sistemas de cominuição, e os novos projetos são totalmente dirigidos para sistemas Autógenos ou Semi-Autógenos, onde a aplicação destas tecnologias se manifesta principalmente na fabricação de equipamentos de grande diâmetro e alta potência, inibindo a indústria local e justificando a globalização das fábricas. O livro apresenta novos conceitos sobre a cominuição e ajuda a destruir diversos paradigmas que historicamente têm acompanhado estas operações.



A Desmistificação da Tecnologia Mineral Permitiria:

- **Fortalecer a indústria nacional** e melhorar suas condições de competitividade, possibilitando irradiar efeitos secundários a toda sociedade, ficando menos dependente do exterior; valorizar os produtos nacionais ou regionais e padronizar a produção de suprimentos (as tecnologias importadas podem conduzir a uma dependência do país fornecedor durante toda a vida do projeto); reduzir custos de engenharia e de desenvolvimento de pesquisas; favorecer a normalização e a qualidade dos produtos. O **Modelo Operacional** define uma nova alternativa: a **Cominuição Convencional Otimizada**, que será amplamente desenvolvida ao longo do texto, e junto com a definição destes circuitos, conclama à comunidade científica e tecnológica para viabilizá-la. Gostaríamos de colaborar com a indústria nacional para desenvolver e oferecer esta opção contra o sistema padrão do fabricante global.
- **Promover uma integração** entre as empresas produtoras, governo, fabricantes locais de equipamentos, laboratórios de pesquisa, universidades e empresas de engenharia, criando um suporte amplo à cultura tecnológica nacional, possibilitando: uma redução geral de custos; a formação profissional integrada com as usinas; uma mudança de atitude nos engenheiros do setor e a desmistificação da tecnologia mineral.
- O **Mercosul** poderia constituir um excelente espaço para discutir e implantar a nova cultura tecnológica, do modo como os países escandinavos fizeram, há muito tempo.

O Desafio do Desenvolvimento Tecnológico

Informações coletadas por **Fuerstenau D.W.** (1988) são resumidas na **Tabela 01**, e mostram como as “novas tecnologias” têm contribuído para que grandes usinas, com grandes e modernos equipamentos, consumam mais água e energia que as antigas usinas convencionais.

Tabela 01 – Usinas de Moagem e de Flotação, EEUU

Ano	Nº Usinas	Capacidade, 10 ⁶ t	Água, m ³ /t	Energia, kWh/t
1960	202	179,9	4,67	17,8
1970	240	367,7	5,02	16,15
1985	179	383,5	9,35	20,23

Na opinião do Autor deste livro, a forte elevação dos custos operacionais de energia elétrica deve-se, em grande parte, à forte penetração comercial dos sistemas semi-autógenos de moagem, comprovadamente mais dispendiosos e ineficientes que os equipamentos convencionais e, também, ao alto nível de enchimento de corpos moedores observado nos moinhos convencionais. O elevado consumo de água deriva do excesso de diluição em polpas e do uso de circuitos fechados de moagem, onde o overflow dos hidrociclones fica extremamente diluído quando aumenta a carga circulante do moinho. Esses e outros paradigmas devem ser enfrentados por laboratórios de pesquisa, universidades, empresas de consultoria e, principalmente, pelas próprias empresas de mineração, as quais precisam questionar as suas operações e abrir espaço para a aplicação de novas idéias, objetivando desmistificar a tecnologia mineral. Dentro dessa filosofia, foi desenvolvido o **Modelo Operacional**.

ALEXIS P. YOVANOVIC
Belo Horizonte/MG, Brasil
Maio, 2005



INDICE

	<u>Página</u>
INTRODUÇÃO	7
PRIMEIRA PARTE: MECANISMOS MACROSCÓPICOS	
1. SISTEMA FENOMENOLÓGICO DA COMINUIÇÃO	
1.1.- Transferência Macromolecular de Massa	15
1.2.- O Estado da Arte	34
1.3.- Fase Rocha: Cominuição	43
1.4.- Fase Polpa: Classificação Interna	56
1.5.- Contato entre as Fases	60
1.6.- Classificação Externa	69
1.7.- Modelo Operacional de Moagem	74
2. SELETIVIDADE	
2.1.- Seletividade na Cominuição	83
2.2.- Britagem Seletiva	89
2.3.- Moagem Seletiva	91
2.4.- Estudo Reológico da Polpa	98
2.5.- Modificações na Seletividade	105
2.6.- Sistema Moagem/Flotação	108
2.7.- A Seletividade e as Cargas Circulantes	118
3. APLICAÇÃO DE ENERGIA	
3.1.- Sistema Energético da Cominuição	121
3.2.- Modelo Energético	126
3.3.- Aplicação Eletromecânica da Energia	134
3.4.- Dimensionamento e Scale-Up	144
3.5.- Otimização da Aplicação de Energia	152
4. CINÉTICA DE COMINUIÇÃO	
4.1.- Sistema Cinético e Mecanismos	159
4.2.- Mecanismo Cinético da Moagem	166
4.3.- Operações Descontínuas	174
4.4.- Operações Contínuas	188
4.5.- Modelos Cinéticos de Cominuição	192
4.6.- Aplicação dos Modelos Cinéticos	207
SEGUNDA PARTE: PESQUISA E PROJETOS DE COMINUIÇÃO	
5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	
5.1.- Testes de Laboratório	213
5.2.- Modelos Energéticos	222
5.3.- Modelos Cinéticos	231
5.4.- Modelo Operacional	237
5.5.- Caracterização de Minérios	246



6. OPERAÇÕES CONVENCIONAIS DE COMINUIÇÃO	
6.1.- Heterogeneidade e Pré-concentração de Minérios	259
6.2.- Britagem	262
6.3.- Moagem	266
6.4.- Estado Estacionário e Equações de Continuidade	275
6.5.- Operação com Hidrociclones	279
6.6.- Liberação e Remoagem para Flotação	293
6.7.- Critérios de Dimensionamento e Otimização	298
7. MOAGEM AUTÓGENA E SEMI-AUTÓGENA	
7.1.- Introdução	307
7.2.- Mecanismos Fundamentais e Definições	309
7.3.- 1908-1980: A Evolução Tecnológica	323
7.4.- A Evolução Tecnológica dos Países Escandinavos	332
7.5.- Primeiros Projetos Industriais nos EEUU e Canadá	346
7.6.- Os Anos 80-90 e o Método do Net Power	359
7.7.- Século XXI – A Imposição Global da Tecnologia	374
Referências Bibliográficas	381
Glossário Português – Español	395



INTRODUÇÃO

Como acontece con muchas operaciones de beneficio de minerales, ingenieros químicos consideran que la cominución (operaciones de chancado y de molienda) es una técnica puramente mecánica de reducción de tamaño de partículas minerales, fuera de su área de actuación. Ingenieros de minas, paradójicamente, utilizan abordajes de la ingeniería química para tentar interpretar y también simular el proceso en analogía con las reacciones químicas y reactores (constantes cinéticas, distribución de tiempo de residencia – RTD, etc.) o con complejas ecuaciones de modelos físicos derivados de los fenómenos de transporte, que pretenden simular virtualmente el flujo dinámico de masa a lo largo del proceso, pero sin indicar la forma óptima de ejecutar esta operación.

Como acontece com muitas operações de beneficiamento mineral, engenheiros químicos consideram que a cominuição (operações de britagem e de moagem) é uma técnica puramente mecânica de redução de tamanho de partículas minerais, fora da sua área de atuação. Engenheiros de minas, paradoxalmente, utilizam abordagens da engenharia química para tentar interpretar e até simular o processo em analogia com as reações químicas e reatores (constantes cinéticas, distribuição de tempo de residência - RTD, etc.) ou com complexas equações de modelos físicos derivados dos fenômenos de transporte, que pretendem simular virtualmente o fluxo dinâmico de massa ao longo do processo, mas sem indicar a forma ótima de executar esta operação.

Enquanto isso, matemáticos participam com técnicas de estatística avançada e programação linear, gerando algoritmos de filtragem que fazem com que qualquer modelo acabe se adaptando à realidade, qualquer que seja esta realidade, seja estimando valores desconhecidos ou difíceis de medir ou mudando dados chamados errados ou “sujos” porque não se ajustam ao modelo utilizado. Versões chamadas de estendidas ou adaptativas desse “filtro matemático” permitem que os próprios parâmetros do modelo original de simulação sejam constantemente modificados, levando em consideração as recentes “experiências” adquiridas pelo processo, a cada instante, como se fosse um avançado sistema de ajuste de curvas. Com tudo isto, a operação ótima do processo ainda permanece desconhecida. Engenheiros mecânicos têm muitas coisas a dizer sobre a distribuição hidráulica de massa nos produtos de muitas operações da área mineral, como a hidrociclonação que fecha alguns circuitos de moagem (underflow/overflow); o transporte de polpa dentro do moinho, em fluxo viscoso, e a hidrodinâmica nos equipamentos. Engenheiros eletricitistas ou eletrônicos criam, comercializam, instalam e operam complexos sistemas de controle, chamados de “especialistas”. Diversas regras fornecidas pelos próprios operadores, ou mediante operadores eletrônicos que utilizam a boa memória dos seus sistemas neurais para aprender as rotinas de operação, dão base ao controle automático das usinas, mas sem proporcionar a orientação básica que a usina precisa em termos de otimização. Reconhecendo a condição de “arte” dos processos minerais foi introduzida a lógica nebulosa ou difusa para considerar as apreciações qualitativas do operador, do tipo: “o moinho está barulhento” ou “hoje tem alto refugo de partículas pelo trommel”.

O engenheiro de processos está perdendo o seu espaço dentro das usinas; por isso e por outras razões é urgente a tarefa de estabelecer uma nova e particular base científica para as operações unitárias da área de beneficiamento mineral. Fábricas locais de equipamentos padronizados, e usinas enxutas, de baixo investimento e custo operacional, requerem também uma interpretação macroscópica simples, porém clara, dos processos de beneficiamento, em geral, e particularmente do processo de moagem, de longe a operação mais cara em investimentos e custo operacional das usinas de beneficiamento mineral.



A Ciência Mineral

*De modo diferente de lo que ocurre en las operaciones unitarias estudiadas en el campo de la Ingeniería Química, las cuales se basan en los fenómenos de transporte de: **cantidad de movimiento, energía y masa**, el área de procesamiento de minerales presenta diversas dificultades que no han permitido la descripción fenomenológica de los mecanismos básicos de ocurrencia de esos procesos y, como consecuencia, han limitado el estudio de modelos de simulación y han dificultado, incluso, la obtención de correlaciones simples entre estudios hechos en laboratorio y la operación continua industrial.*

Diferentemente do que acontece nas operações unitárias estudadas no campo da Engenharia Química, as quais estão baseadas nos fenômenos de transporte de **quantidade de movimento, energia e massa**, a área de processamento de minérios apresenta diversas dificuldades que não têm permitido a descrição fenomenológica dos mecanismos básicos de ocorrência desses processos e, como consequência, têm limitado o estudo de modelos de simulação e têm dificultado, inclusive, a obtenção de correlações simples entre estudos feitos em laboratório e a operação contínua industrial.

Os processos de transferência de massa observados na indústria química são moleculares e tendem naturalmente ao equilíbrio, permitindo assumir condições de continuidade baseadas no conhecimento do gradiente de transporte em qualquer corte transversal ao fluxo, ou fluxos, geralmente em fases homogêneas. Desse modo, a sua modelagem, baseada no gradiente de transporte e comportamento cinético se aproxima perfeitamente da realidade industrial, quase independente de relações de escala.

Na área mineral os mecanismos de ocorrência são bastante complexos; o próprio minério é muito variável, justamente naquelas propriedades que afetam diretamente o fenômeno na forma de distúrbios de entrada (dureza, grau de liberação, etc.), o qual acontece normalmente em fases muito pouco homogêneas (rocha, polpa) e por tanto de difícil representação em simulações matemáticas. No caso da operação de moagem, por exemplo, o fenômeno de **cominuição** resulta da mistura de três componentes principais: o impacto, a atrição e a abrasão. Cada componente apresenta diferente eficiência no seu aproveitamento energético sobre o minério, cuja ação é executada por diversos tipos de corpos moedores (bolas de ferro, de aço ou de porcelana, barras de ferro, “pebbles” do próprio minério, etc.) que depende também da viscosidade do meio em que atuam e de outras inúmeras variáveis.

Desse modo, as operações de redução de tamanho, de separação e de transporte macromolecular precisam de uma nova concepção teórica, como ilustrado na **Figura I.1**.

Fenômenos de Tratamento de Minérios

O **Modelo Operacional** propõe uma nova concepção macro-fenomenológica para o estudo das operações unitárias de tratamento de minérios, isto é, estabelece novas bases teóricas para os **fenômenos de ocorrência** dessas operações: **Cominuição** (moagem, britagem), **Separação com Concentração** (gravimetria, separação magnética, hidrociclonagem, flotação, etc.) e fenômenos auxiliares inerentes ao **Transporte Macromolecular** em meio viscoso (leis da hidráulica, viscosidade, etc.) como ilustrado na **Figura I.2**.



Figura I.1 – A Nova Abordagem da Ciência Mineral

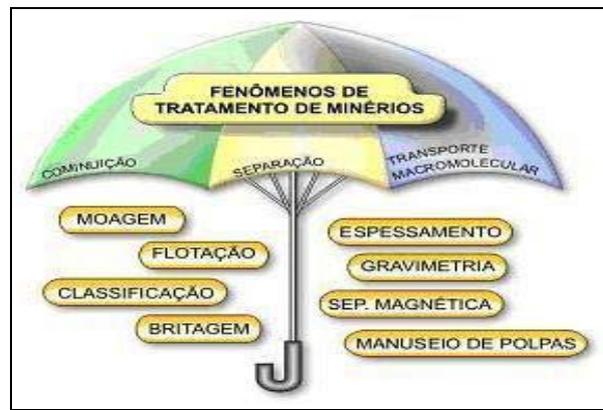


Figura I.2 – Fenômenos de Tratamento de Minérios

Nesta nova abordagem, o **Modelo Operacional** introduz novos conceitos na área mineral:

1. **Fenômeno Real**

A **Moagem** leva em conta, além do fenômeno natural de cominuição, os sub-processos de classificação hidráulica e de transporte macromolecular em meio viscoso, incorporando as atuações do operador nas rotinas de simulação.

2. **Transferência Macromolecular de Massa**

A transferência de massa, como fenômeno de transporte, é interpretada de maneira macromolecular, onde a liberação dos grãos da solução rochosa (mediante a aplicação de energia) é observada em analogia com as operações diretas de destilação fracionada, utilizadas na engenharia química. O Modelo estabelece a Curva de Liberação (em função da aplicação de energia) e o Fator de Separação do processo.

3. **Equações de Continuidade**

A descrição do processo no estado estacionário é feita a partir de equações de continuidade, acompanhando o fluxo principal do processo e abrindo as tradicionais “caixas pretas” que escondem circuitos fechados ou operações em etapas.

4. **Conceito “Operacional” do Modelo**

As rotinas de cálculo orientam as **atuações operacionais** dentro da usina para levar o processo até condições próximas do evento natural que ocorreria na hipótese de tratar-se de um processo químico molecular.



Em resumo, O **Modelo Operacional** consiste num novo fundamento científico para interpretar as operações de beneficiamento de minérios. O modelo é **macrofenomenológico**, porque define novos mecanismos mensuráveis para descrever os fenômenos envolvidos; **operacional**, porque incorpora a atuação do operador dentro das equações que descrevem os processos; e **otimizante**, porque ele determina as condições ótimas de operação e permite que o operador (ou o sistema de controle automático) induza o processo até o ponto ótimo.

Leis Matemáticas e Aplicações do Modelo

- **Primeira Lei:** Define o fenômeno fundamental, ou propriedade macrofenomenológica e o seu scale-up para a operação contínua industrial. É o caso do **Índice de Cominuição (IC)** no processo de moagem.
Aplicações: Avaliação de estudos em laboratório e/ou usina piloto; rotinas de “scale-up”; dimensionamento dos equipamentos; maior confiabilidade do projeto.
- **Segunda Lei:** Expressão matemática que descreve o processo em estado estacionário, chamada de **Equação de Continuidade**.
Aplicações: Avaliação geral / diagnóstico da usina; controle preciso dos operadores sobre a usina; identificação de problemas operacionais; avaliação de sub-processos dentro de processos compostos (como os ciclones dentro do circuito fechado).
- **Terceira Lei:** Equação matemática que expressa a condição ótima para o processo, Chamada de **Equação de Otimização**.
Aplicações: Sugestões de otimização; alterações no layout; programas para otimização de processos (software); máxima capacidade e/ou mínimo custo de operação; melhores resultados metalúrgicos; sistemas especialistas de controle; estabilidade operacional.

A **Figura I.3** ilustra a estrutura do modelo.



Figura I.3 – A Estrutura do Modelo Operacional

A cominuição é interpretada como um processo de transferência macromolecular de massa (grãos), entre as fases rocha e polpa. O modelo propõe uma analogia com a operação química, direta, de transferência de massa por *destilação fracionada*, onde os grãos das substâncias do nosso interesse são extraídos da solução sólida (a rocha) para um maior estado de liberação em meio fluidizado (polpa), mediante a aplicação de energia (impacto, atrição e abrasão). Esta cominuição, ao ser aplicada a rochas com componentes heterogêneos, como acontece na maioria das vezes, produz um certo grau de separação e de concentração dos grãos (teor individual dos grãos, pela sua maior liberação) que permite uma certa seletividade



dentro do próprio processo de moagem e facilita a sua posterior separação mássica com concentração através de outras operações unitárias (como a separação magnética e a flotação).

Estabelecendo a **Curva de Liberação** (em função da aplicação de energia) é possível obter balanços macroscópicos associados aos resultados metalúrgicos, de acordo com o **Ponto de Operação** requerido pelo processo ou definido durante o projeto de uma usina. O sistema de **Aplicação de Energia** pode ser otimizado, aproveitando a seletividade do fenômeno e utilizando práticas convenientes de operação que permitam que o material receba o máximo possível da energia total aplicada ao equipamento.

O **Modelo Operacional** introduz o **Índice de Cominuição** nas operações de moagem, como uma nova propriedade macrofenomenológica que permite enlaçar o fenômeno natural de cominuição com as características do equipamento, da operação, e da aplicação de energia ao moinho, permitindo o dimensionamento otimizado, o controle e a otimização das operações industriais. Os parâmetros de projeto podem ser determinados a partir do laboratório. Essa nova interpretação teórica, acompanhada de exemplos e figuras explicativas, poderá ser de muita utilidade para os pesquisadores da área mineral, proporcionando uma base de avaliação fortemente ligada à operação industrial. Os engenheiros de processo e operadores poderão contar com uma boa ferramenta de avaliação, otimização e controle das suas operações de moagem e de cominuição em geral.

Estudantes de engenharia, utilizando os conceitos aqui expostos, poderão interpretar de uma outra forma as operações mecânicas de cominuição, como já foi publicado para as operações de separação com concentração (separação magnética, flotação, gravimetria, etc.). A disciplina "Fenômenos de Transporte Macromolecular de Massa", poderá vir a ser um novo apoio para os profissionais da área química e mineral, particularmente para estes últimos, nessa constante procura do seu particular espaço científico/teórico nas ciências da engenharia.

Os objetivos principais deste livro são:

- Organizar o sistema fenomenológico da cominuição na ótica da engenharia de processos, numa seqüência que permita sua apresentação e ensino acadêmico.
- Introduzir uma nova interpretação teórica do fenômeno de cominuição, em apoio à ciência mineral, dentro de um original contexto macrofenomenológico criado para as operações de beneficiamento, em geral, baseado na transferência macromolecular de massa.
- Separar, na teoria e na prática das operações industriais de moagem, os sub-mecanismos de cominuição e de classificação interna, e os sub-processos de classificação externa e de transporte de polpa em estado estacionário.
- Colaborar na criação de uma nova matéria curricular para estudantes de engenharia química e de minas: a "Transferência Macromolecular de Massa".
- Aprofundar o estudo de mecanismos macroscópicos em escala de laboratório, visando a sua simplificação e o seu scale-up para as operações industriais.
- Criar um elo científico que aprimore a compreensão dos processos de cominuição e a relação entre os diversos mecanismos envolvidos.
- Ajudar a "desmistificar" a tecnologia mineral.
- Estabelecer metodologias claras de avaliação de equipamentos de cominuição e de circuitos, para subsidiar a tomada de decisões dentro das usinas.
- Colaborar no desenvolvimento de uma cultura tecnológica nacional e regional (no âmbito da América do Sul), facilitando o dimensionamento e a fabricação local padronizada de equipamentos de cominuição.

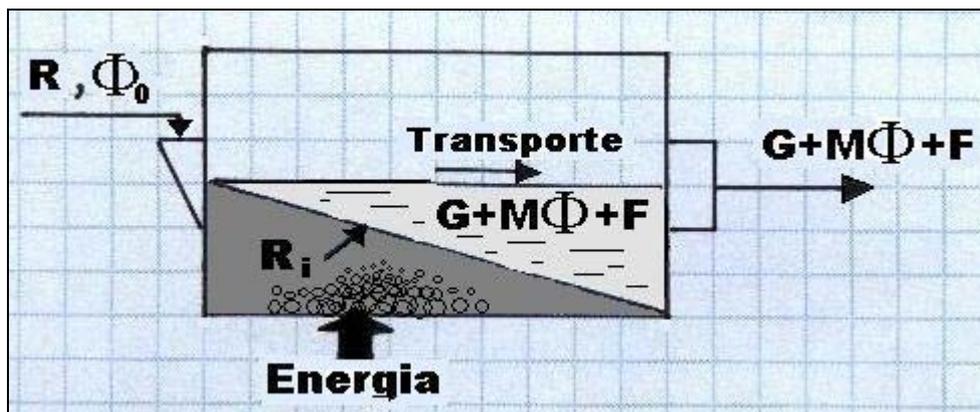


- Estabelecer uma nova metodologia para otimização e controle dos processos, como ferramenta de ajuda aos operadores de usinas de beneficiamento.



PARTE 1

MECANISMOS MACROSCÓPICOS







CAPÍTULO 1

SISTEMA FENOMENOLÓGICO DA COMINUIÇÃO

1.1 Transferência Macromolecular de Massa

1.1.1 Introdução

*En el campo de la Ingeniería Química, la transferencia de masa se entiende como la modificación de las composiciones químicas de las soluciones y mezclas por medio de métodos que no necesariamente implican en reacciones químicas. Esas operaciones son dirigidas, habitualmente, a la separación de una sustancia en sus partes componentes. En el caso de mezcla de partículas minerales tales separaciones pueden ser totalmente mecánicas, como ocurre en algunas de las operaciones de beneficio de minerales; por ejemplo: el filtrado y la clasificación por harneo. Ahora, la separación entre partículas sobre la base de su densidad, o su susceptibilidad magnética y también la separación de masa por flotación, entre otras, envuelven cambios de la composición química entre los productos o fases separadas y, como fue dicho, al incluir mudanzas en la composición de los flujos definiremos estas últimas como **Operaciones con Transferencia Macromolecular de Masa**. Al separar de su roca un determinado mineral es posible utilizar la operación con transferencia molecular de masa de “lixiviación” o por el método de “cominución”, introducido en este libro como operación con transferencia macromolecular de masa.*

No campo da Engenharia Química, a transferência de massa se entende como a modificação das composições químicas das soluções e misturas por meio de métodos que não necessariamente implicam em reações químicas. Essas operações são dirigidas, habitualmente, à separação de uma substância em suas partes componentes. No caso de misturas de partículas minerais tais separações podem ser inteiramente mecânicas, como ocorre em algumas operações de beneficiamento mineral; por exemplo: a filtragem e a classificação por peneiramento. Agora, a separação entre partículas sobre a base da sua densidade ou a sua susceptibilidade magnética e também a separação de massa por flotação, entre outras, envolvem mudanças da *composição química* entre os produtos ou fases separadas e, como foi dito, ao incluir mudanças na composição dos fluxos definiremos estas últimas como **Operações com Transferência Macromolecular de Massa**. Ao separar da sua rocha um determinado minério, é possível utilizar a operação com transferência molecular de massa de “lixiviação” ou pelo método de “cominuição”, introduzido neste livro como operação com transferência macromolecular de massa.

Quase todas as operações unitárias da engenharia química são descritas sob a ótica cinética (Smith J.M., 1971; Levenspiel O., 1972), quando se trata de operações que envolvem reações químicas; por modelos físicos introduzidos pelos Fenômenos de Transporte (Bird e outros, 1960), quando se conhecem os princípios físicos fundamentais que regulam as leis básicas do transporte contínuo e molecular de quantidade de movimento, energia e massa; ou apenas por fundamentos básicos do transporte molecular com base nos gradientes de transporte e as condições de equilíbrio, como é feita com a maior parte das operações, particularmente nas operações com transferência de massa (Treybal R.E., 1970). Muitas operações de beneficiamento mineral, devido à falta de uma particular concepção das suas operações, utilizam conceitos derivados da engenharia química para tentar simular os processos e interpretar os seus mecanismos macroscópicos de ocorrência.



A utilização destas abordagens pelas operações mecânicas de beneficiamento mineral tem seguido, quase sem exceção, as seguintes linhas de trabalho:

- a) *Modelos Cinéticos*: Requerem de um estudo da velocidade de ocorrência do fenômeno e dos procedimentos de scale-up que relacionam o tempo medido no laboratório, em batelada, até operações contínuas na escala industrial;
- b) *Modelos Físicos ou Mecanicistas*: Requerem do conhecimento dos princípios físicos fundamentais de todos os subprocessos envolvidos na operação, em continuidade; ou seja, do fluxo alimentado, do equipamento, da aplicação de energia, do transporte macromolecular em meio viscoso, dos distúrbios de entrada, etc.

Fatalmente, nenhuma destas abordagens tem conseguido resolver com segurança os aspectos básicos de engenharia de processos minerai, como o scale-up, o dimensionamento, a simulação e a otimização, como é amplamente reconhecido no meio científico mineral. O **Modelo Operacional** vem a apresentar uma nova interpretação macrofenomenológica para as operações de beneficiamento, em geral, baseada na **Transferência Macromolecular de Massa**, matéria esta que estamos sugerindo para incorporar no currículo de estudos para os estudantes de engenharia química e de minas. Não é o objetivo deste livro aprofundar na teoria da disciplina de Transferência de Massa, mas utilizar, de maneira simplificada, os conceitos mais relevantes dela para a compreensão do processo de cominuição sob esta nova ótica. Fica aberto o debate para o desenvolvimento de uma nova disciplina, a "Transferência Macromolecular de Massa", para ser incorporada no programa de estudo dos engenheiros químicos e de minas (está em preparação um livro específico sobre este tema).

1.1.2 Nova Abordagem Teórica para a Cominuição

O **Modelo Operacional** propõe uma analogia entre os processos químicos de transferência de massa e alguns dos processos mecânicos de beneficiamento de minérios, configurando uma nova interpretação macrofenomenológica para esses processos e, no caso particular deste livro, para o processo de **cominuição** ⁽¹⁾. Na indústria química, as operações diretas produzem duas fases a partir de uma solução de uma fase só, mediante a aplicação ou extração de calor (a destilação fracionada e a cristalização fracionada pertencem a este tipo). As operações indiretas envolvem a adição de outra substância e compreendem, entre outras, as operações de absorção gasosa e a dessorção, como foi utilizado para modelar o processo de Concentração de Massa por Flotação (Yovanovic, 2004).

Na área mineral, a **cominuição** de partículas pode ser interpretada como uma operação direta (apenas que irreversível no caso da cominuição) em analogia com a operação de **destilação fracionada**. A destilação é um método de separação utilizado na engenharia química para separar os componentes de uma solução, o qual depende da distribuição das substâncias entre as fases gasosa e líquida, e é aplicável aos casos onde todos os componentes estejam presentes em ambas fases. Em lugar de introduzir uma nova substância na mistura para obter uma segunda fase, na destilação a fase gasosa é criada a partir da solução original por evaporação, com a aplicação de calor, de modo que o custo de adicionar energia deve ser sempre levado em conta nestas operações.

(1) Definiremos a **cominuição** como sendo o processo de redução de tamanho das partículas, em geral (inclui a britagem e a moagem). Por outro lado, a **moagem**, é uma forma prática de utilizar o fenômeno de cominuição que inclui sub-mecanismos de impacto, atrição e abrasão, e, comumente, a utilização de corpos moedores, principalmente bolas de aço, como será tratado preferencialmente neste texto.



A cominuição acontece mediante a aplicação de energia, criando impacto, atrição e abrasão, de modo que podemos separar (desagregar) uma substância da sua rocha liberando ela em fragmentos de diversos tamanhos e com diferentes graus de liberação. A liberação dos grãos individuais das substâncias inseridas na rocha (que seria, analogicamente, a mistura a ser submetida à destilação, onde os grãos representariam às moléculas) permite, nos materiais heterogêneos, o incremento do teor individual das partículas (liberação dos grãos) criando algum grau de classificação que incrementa o gradiente entre as fases rocha e polpa, utilizando e maximizando as diferenças específicas entre as substâncias liberadas, como por exemplo: a hidrofobia, a susceptibilidade magnética, a gravidade específica das substâncias e o próprio tamanho das partículas (fragmentos) ou grãos de substâncias diferentes.

La roca será definida como una disolución en fase sólida de sustancias do nuestro interés, dentro de una solución de ganga. El grano será considerado como la unidad básica macromolecular del transporte. Este grano está inicialmente inserto en la roca, “disuelto” en ganga, y junto con la aplicación de energía de conminución este grano acompaña los fragmentos de la roca que está siendo conminuída, partículas que son cada vez de menor tamaño y con mayor grado de liberación. El grado de liberación corresponde a la proporción de granos de sustancia y de ganga dentro de las partículas mixtas. Las partículas de menor tamaño normalmente presentarán mayor liberación. El objetivo de la conminución es definido con base en una determinada liberación de los granos de nuestro interés, considerada aceptable para la operación de separación que viene a seguir, y que normalmente corresponde a 80% de proporción de granos liberados dentro de una partícula mixta.

Carpenter R.D. (1957) afirma que, en la medida en que el mineral es molido, las fracturas ocurren más rápido a lo largo de los bordes de los granos, de modo que los minerales son primero reducidos hasta tamaños próximos al tamaño natural del grano. En la óptica del Modelo operacional, la conminución es como si quisiéramos separar los granos de maní de dentro de una solución sólida de chancaca, de una roca (dulce) llamada “pé de moleque” (Brasil). El proceso posterior, de molienda todavía más fina, considera la reducción de tamaño abajo del tamaño natural del grano, siendo más difícil, pues involucra la fractura del propio grano.

A rocha será definida como uma dissolução em fase sólida de substâncias do nosso interesse, dentro de uma solução de ganga. O grão será considerado como a unidade básica macromolecular do transporte. Este grão está inicialmente inserido na rocha, “dissolvido” em ganga, e junto com a aplicação de energia de cominuição este grão acompanha os fragmentos da rocha que está sendo cominuída, partículas estas cada vez de menor tamanho e com maior grau de liberação. O grau de liberação corresponde à proporção de grãos de substância e de ganga dentro das partículas mistas. As partículas de menor tamanho normalmente apresentarão maior liberação. O objetivo da cominuição é definido com base numa determinada liberação dos grãos do nosso interesse, considerada aceitável para a operação de separação que se segue, e que normalmente corresponde a 80% de proporção de grãos liberados dentro de uma partícula mista.

Carpenter R.D. (1957) afirma que, na medida em que o minério é moído, as fraturas ocorrem mais rapidamente ao longo das bordas dos grãos, de modo que os minérios são primeiramente reduzidos até tamanhos próximos ao tamanho natural do grão. Na ótica do **Modelo Operacional**, a cominuição é como se quiséssemos separar os grãos de amendoim de dentro de uma solução sólida de rapadura, de uma rocha (doce) chamada “pé de moleque”. O processo posterior, de moagem ainda mais fina, envolve a redução de tamanho abaixo do tamanho natural do grão, sendo mais difícil, pois envolve a fratura do próprio grão.



As características específicas das substâncias presentes na rocha são mais evidenciadas quando o minério é mais heterogêneo (mais substâncias dentro da rocha) e quando a aplicação de energia é maior, ou seja, quando a redução do tamanho e a liberação dos grãos são mais acentuadas, aproximando o tamanho das partículas ao tamanho do próprio grão de cada substância. A aplicação de energia é muito complexa quando se trata da moagem e a sua medida macroscópica envolve perdas eletromecânicas de transmissão, de movimentação dos equipamentos, de corpos moedores, e do próprio minério (em fase polpa ou seco). A energia líquida utilizada pela moagem no mecanismo específico de cominuição é quase impossível de medir, pois envolve muitas perdas por ineficiência, dissipação por ruído e calor, gasto energético entre os próprios corpos moedores, entre corpos moedores e o revestimento do moinho, etc.

Definida a cominuição como um fenômeno de desagregação e separação com transferência macromolecular de massa, analisaremos a seguir esta operação da forma como são estudadas as operações da engenharia química.

1.1.3 Transferência de Partículas

A cominuição é uma operação de liberação de componentes de misturas heterogêneas de partículas sólidas dissolvidas em rocha. O que permite liberar estas partículas e a aplicação de energia, mediante a operação de **britagem**, por exemplo, onde o mecanismo de aplicação de energia é mais individualizado e direto, entre a partícula e o meio de cominuição (impacto em moinhos de martelos – britagem seletiva - ou atrição em britadores de cone ou de mandíbulas – britagem homogênea) ou a operação de **moagem**, tema principal deste texto, onde a cominuição acontece pela mistura de mecanismos de impacto, atrição ou abrasão, mediante a utilização de corpos moedores. Ao recolher os fragmentos das partículas moídas, nas operações que definiremos como de “**moagem seletiva**”, teremos conseguido uma certa **classificação** com a concentração da substância de nosso interesse manifestada na maior limpeza do grão individual desta, que permite, após cada evento de quebra, pelas suas peculiaridades físicas, ajudar a separar internamente as fases rocha - polpa, permitindo a utilização direcionada de energia sobre a fase rocha remanescente.

O modo de fazer essa operação consiste em colocar em contato o material com os corpos moedores e transferir energia para o equipamento, como si quiséssemos colocar uma solução em ebulição. A operação de moagem é irreversível, de modo que a transferência de partículas possui apenas o sentido rocha → polpa (ou, no caso analógico, solução → vapor).

Nas **operações seletivas** de britagem ou de moagem, é o minério que deve comandar a operação da sua própria cominuição, exteriorizando as suas peculiaridades junto com a liberação das substâncias inseridas na rocha, e essas peculiaridades devem ser aproveitadas em benefício da seletividade e dos menores custos do processo; nas **operações homogêneas**, cujo objetivo é apenas a redução de tamanho, é normalmente o equipamento quem conduz o fenômeno. Na medida em que as partículas são cominuídas a aplicação de energia torna-se mais difícil e mais ineficiente (por tanto mais cara). O impacto, as forças de pressão localizadas, a esfregação entre as partículas e o equipamento, etc. são as formas como os grãos vão abandonando a sua fase inicial, na rocha, e tornando-se liberadas. Existem formas mais eficientes de proporcionar esta energia, dependendo das necessidades do processo, tanto pelas características da rocha como pelo adequado dimensionamento dos equipamentos.



1.1.4 Mecanismos de Transporte

*En escala molecular, la transferencia de masa en una determinada fase es el resultado de una diferencia de concentración o **gradiente**, de modo que las moléculas individuales se difunden, moviéndose desde un lugar de alta concentración hasta otro de baja concentración. De manera diferente, en el área mineral, la **transferencia macromolecular** de masa ocurre como resultado de la aplicación de alguna fuente de **energía externa** que permite la “**migración**” de partículas, como por ejemplo, un campo magnético para separar partículas de mayor susceptibilidad magnética, la fuerza centrífuga en hidrociclones – aprovechando la diferente gravedad específica de determinadas especies, la fuerza de hidrofobia para el fenómeno de flotación y para el caso de la cominución, el gradiente proviene de la fuerza aplicada en la quiebra, en la fase **roca**.*

Na escala molecular, a transferência de massa numa determinada fase é o resultado de uma diferença na concentração ou **gradiente**, de modo que as moléculas individuais se difundem, deslocando-se desde um lugar de alta concentração até outro de baixa concentração. Diferentemente, na área mineral, a **transferência macromolecular** de massa acontece como resultado da aplicação de alguma fonte de **energia externa** que permita a “**migração**” de partículas, como por exemplo, um campo magnético para separar partículas de maior susceptibilidade magnética, a força centrífuga em hidrociclones – aproveitando a diferente gravidade específica de determinadas espécies, a força hidrofóbica para o fenômeno de flotação e, para o caso da cominuição, o gradiente provém da diferença entre a tensão de quebra da partícula e a energia aplicada na *quebra*, na fase **rocha**.

Para a cominuição de **materiais homogêneos** ou quando o interesse da operação de cominuição é apenas a redução de tamanho de toda a massa submetida ao processo, o mecanismo se resume à mudança de tamanho médio entre a alimentação **F** até um produto **P**, mediante a aplicação de energia.



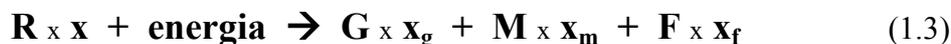
Os modelos de simulação, chamados de “*energéticos*”, estabelecem que o consumo específico de energia é função da redução de tamanho geral da rocha alimentada, do tipo:

$$\mathbf{Energia} = f(\mathbf{P / F}) \quad (1.2)$$

Para processos convencionais de moagem é adotado como critério de medida a avaliação da malha onde 80% das partículas são passantes (**F80** e **P80**). Em processos de moagem muito fina é considerada a medida da **superfície específica** obtida no produto (a moagem de alguns materiais industriais, de cimento e de finos de minério de ferro para pelotização, são alguns exemplos). A britagem de material de construção é também um processo de cominuição que não persegue um processo posterior de separação com concentração de massa. Uns dos maiores problemas atuais no estudo e modelagem das operações de moagem é que os trabalhos de pesquisa e de projeto utilizam quase que unicamente a concepção homogênea do fenômeno, inclusive para processos de moagem seletiva com separação e concentração posterior de massa, onde a medida do **P80** no produto não reflete exatamente o grau de liberação necessário da substância do nosso interesse. Conhecendo as características da rocha e os objetivos finais da cominuição (o processo que vem a seguir), é possível definir o caminho a ser percorrido no processo de pesquisa e de projeto das instalações de cominuição, o qual possui diversas alternativas, como será visto ao longo do texto.



Para o caso da **britagem de materiais heterogêneos** ⁽¹⁾ (como são a maioria dos minérios), podemos expressar a reação de desagregação levando em conta a seletividade derivada da *concentração* da substância **A** do nosso interesse (teor **x**) em determinadas faixas granulométricas, na operação de **britagem seletiva**, onde o produto pode ser posteriormente separado para produzir a *pré-concentração* do minério de interesse.



Onde,

R = Rocha; [**R**] = **R** × **x** = concentração da substância de interesse na Rocha

G = Grossos, com teor **x_g**;

M = Minério pré-concentrado, com teor **x_m**;

F = Finos, com teor **x_f**.

A expressão (1.3) será bastante utilizada ao longo do texto e constitui a expressão fundamental que descreve a abordagem analógica do processo de **britagem seletiva** de partículas heterogêneas com finalidade de pré-concentração. Se **x_g** for baixo, por exemplo, inferior ao teor de corte (cut-off) estabelecido na operação de lavra (**x_g** < **x_c**), o material grosso poderia ser descartado mediante a operação de peneiramento do fluxo, como acontece com minérios cuja base rochosa contém excesso de magnetita. Além disso, se o teor da parcela fina (**x_f**) é pouco significativo, de modo que a distribuição [**F**] não é muito importante, esta parcela de massa pode ser descartada mediante a operação de hidrociclonação. Este último procedimento é muito importante para minérios alterados, principalmente em lavras a céu aberto, onde os finos (lamas) naturais provenientes da jazida são altamente prejudiciais para os processos posteriores de concentração, acarretando diversas impurezas difíceis de separar após a mistura entre elas e os finos de minério, gerados nas operações de moagem.

O Produto é agora, **P** = [**M**] = **M** × **x_m**; e a eficiência da pré-concentração é:

$$E_{PC} = [\mathbf{M}] / [\mathbf{R}] \quad , \text{Recuperação de } \mathbf{A} \quad (1.4)$$

Na fase do produto, que para o caso da **moagem a úmido** trata-se de polpa, existe normalmente algum grau de classificação com potencialidade para a separação interna das partículas de **A** da ganga, mesmo com diferentes graus de liberação, e de fragmentos de rocha original com mistura pobre de **A** e ganga. A obtenção de grãos totalmente livres de **A** é muito improvável de modo que, para efeitos práticos, o processo de desagregação é interrompido no momento de atingir uma *liberação* considerada suficiente da substância de interesse para as necessidades de processamento posterior (**Φ**). A rigor, a equação 1.1 acontece sucessivas vezes, através de inúmeros eventos de quebra, até atingir a liberação desejada das espécies, e é válida tanto para o estado não estacionário como para o estado estacionário ⁽²⁾. Na **Figura 1.1.1**, a modo de exemplo, é mostrada a distribuição de minério de Pirocloro (**Yovanovic**, 1988), cuja rocha apresentava um teor médio (**x**) de 1,15 % de Nb₂O₅, a partir da britagem seletiva em britador de martelos.

-
- (1) A rocha **heterogênea** contém várias substâncias imersas, com características físicas diferentes, como gravidade específica, tamanho dos grãos e outras. Um exemplo de materiais **homogêneos** é o cimento, onde o processo de cominuição pretende apenas reduzir o tamanho geral das partículas, sem fins de separação ou concentração, procurando aumentar a sua superfície específica. O processo de moagem de finos de minério de ferro para pelletização possui parcialmente esta característica.
 - (2) É característico da operação em **estado estacionário** que as concentrações em qualquer ponto do equipamento permaneçam constantes através do tempo. É uma característica da operação em **estado não estacionário** que as concentrações em qualquer ponto do equipamento mudem com o tempo. As operações realizadas em forma descontínua se encontram sempre entre as do tipo em estado não estacionário.



As malhas de referencia utilizada foram de +595 μm para os *grossos* e de $-9 \mu\text{m}$ para os *finos*. Neste caso, os resultados obtidos foram:

G = 32,15 % da massa, e $x_g = 0,55 \text{ 5Nb}_2\text{O}_5$;

M = 54,92 % da massa, e $x_m = 1,58 \text{ 5Nb}_2\text{O}_5$;

F = 12,93 % da massa, e $x_f = 0,83 \text{ 5Nb}_2\text{O}_5$.

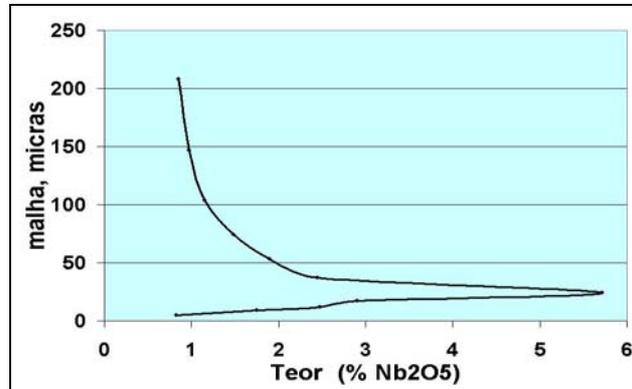


Figura 1.1.1 – Britagem Seletiva de Pirocloro (Yovanovic, 1988)

Para o caso da **moagem de materiais heterogêneos** (como são a maioria dos minérios), podemos expressar a reação de desagregação levando em conta a seletividade derivada da *liberação* da substância **A** do nosso interesse (Φ) em determinadas faixas granulométricas, na operação de **moagem seletiva**, onde o produto pode ser posteriormente submetido a operações de separação com concentração de massa (separação magnética, flotação, etc.).



Onde,

Φ_0 = Grau de liberação da substância de interesse (**A**) na Rocha;

Φ = Grau de liberação da substância de interesse na parcela principal do produto.

A expressão (1.5) será bastante utilizada ao longo do texto e constitui a expressão fundamental que descreve a abordagem analógica do processo de **moagem seletiva** de partículas heterogêneas. Este tipo de representação admite diversas formas e, na nossa ótica, a mais simples delas deve ser sempre utilizada, dada a enorme complexidade desta operação na escala contínua industrial, onde outros sub-processos devem ainda ser considerados. O grau de liberação (Φ) corresponde à proporção de grãos de substância e de ganga dentro das partículas mistas. O objetivo da moagem é definido com base numa determinada liberação dos grãos do nosso interesse, considerada aceitável para a operação de separação que se segue, e que normalmente corresponde a 80% de proporção de grãos liberados dentro de uma partícula mista. A avaliação de Φ é feita considerando o valor médio da liberação entre diversas faixas granulométricas, considerando valores máximo (**G**) e mínimo (**F**), de acordo com o tamanho de partícula compatível com o processo que se segue (detalhes no item 1.1.6).

Para o caso da *flotação* de muitas espécies, por exemplo, partículas acima de 200 μm ou menores que 5 μm são difíceis de flotar, de modo que a avaliação de placas polidas no microscópio é feita preferencialmente entre estas faixas ($200 > M > 5$). É de esperar-se uma maior liberação das partículas finas com respeito ao valor base da faixa **M** e, pelo contrário, uma menor liberação nas partículas mais grosseiras, de modo que não é importante conhecer exatamente os graus de liberação destas faixas.



Obviamente, cada caso irá definir a sua própria faixa de massa **M**, como por exemplo, na moagem primária com objetivo de separar grãos de maior tamanho de magnetita, onde a liberação é obtida em tamanhos entre 10 a 35 mesh (420 a 1.680 μm).

Nas operações de flotação, como será visto no item 2.6, do próximo **Capítulo 2**, pode resultar necessário separar a fração **F**, antes de flotar. A fração **G** normalmente sai diretamente pelo rejeito, afundando com facilidade. A eficiência obtida na liberação da substância **A** no produto da moagem, depende diretamente da aplicação de energia, da forma:

$$\text{Energia} = f(\Phi / \Phi_0) \quad (1.6)$$

Como veremos, na moagem seletiva de rochas heterogêneas a liberação das partículas pode ser obtida moendo o material de diferentes formas, onde normalmente será utilizado o menor consumo específico de energia quando o valor de Φ seja obtido com o máximo tamanho possível no produto (**P80**). O **Modelo Operacional** estabelece que, nas operações de moagem, o produto não deve ser apenas avaliado como uma questão de **tamanho**, mas de **liberação** da substância do nosso interesse. O **Capítulo 2** é inteiramente dedicado às operações de **cominuição seletiva**. Na **Tabela 1.1.1** é resumido o mecanismo de transporte seletivo de Produto a partir da Rocha.

Tabela 1.1.1 – Desagregação do Produto a Partir da Rocha

ROCHA	ENERGIA	TAMANHO	CATEGORIA	TEOR	LIBERAÇÃO
R, Φ_0 Teor, x F80	E →	g	G	x_g	$< \Phi$
		m_1	M	x_m	Φ
		m_2			
		m_3	F	x_f	$> \Phi$

O importante é poder definir algumas medidas macroscópicas que permitam estabelecer o **ponto de operação** do processo (tamanho / liberação) e as relações de scale-up com os equipamentos contínuos; estes mecanismos são: A **Cinética de Liberação** (em função da energia aplicada) e a **Função Transporte** (em função da velocidade de retirada do produto) que são utilizadas normalmente para definir o tamanho e a capacidade volumétrica dos equipamentos; e a **Seletividade**, que resulta da *Curva de Seletividade*, que reflete a preferência de cominuir a substância de interesse em relação às outras e à própria ganga, na fase rocha; além disso, existe a *classificação interna* na fase polpa que proporciona condições que permitem otimizar a performance operacional; a **Aplicação de Energia**, que reflete a eficiência da recepção de energia por parte das partículas atingidas e as dificuldades de cominuição inerentes ao minério (como a dureza da solução sólida de ganga, onde a substância está inserida, e o tamanho dos grãos da substância do nosso interesse), sendo esta última fundamental para a otimização dos custos de operação.

*Para manter o sentido analógico do **Modelo Operacional** com as operações químicas de transferência molecular de massa, neste caso com a destilação, consideremos a operação de separação de uma solução líquida de amônia e água, mediante a operação de destilação. Aplicando calor, podemos evaporar parcialmente a solução e criar de tal forma uma fase gasosa consistente de nada mais do que amônia e água. Como o gás será mais rico em amônia que o líquido residual (ponto de ebulição mais baixo e maior pressão de vapor da amônia), teremos como resultado um certo grau de separação. A seguir, mediante uma adequada manipulação das fases e através de evaporações e condensações repetidas, é possível realizar uma separação tão completa como se deseje, recuperando ambos componentes da mistura num estado tão puro quanto se deseje.*



1.1.5 Gradientes e Forças Impulsoras

ROCHA: COMINUIÇÃO

Os grãos de diferentes substâncias inseridas na formação rochosa do minério são desprendidos da mistura quando a rocha é atingida por força externa (impacto, atrição ou abrasão), atingindo algum grau de concentração pela maior liberação dos grãos (maior teor individual) e apresentando tendência à classificação com base nalguma propriedade específica de cada substância que mostre maior diferença com as outras substâncias presentes na mistura (como a gravidade específica no caso da fase polpa, dentro do moinho, produzindo uma sedimentação das partículas mais pesadas). A retirada de alguma parcela de massa, aproveitando apenas o grau de separação produzido diretamente pela cominuição, faz parte do contexto da **pré-concentração** de minérios (a deslamagem também está considerada nesta operação), e a sua utilização será muito explicada e recomendada ao longo deste texto. A velocidade média de liberação da partícula, desde sua solução rochosa, dependerá da intensidade da energia aplicada e do grau de dureza da rocha. A aplicação de energia normalmente é inversamente proporcional ao tamanho individual dos grãos, se desprendendo mais rápido as partículas de maior grão individual. Os minérios definidos como “moles” precisarão de menor energia para atingir o grau de liberação desejado.

Voltemos ao exemplo da desagregação de grãos de amendoim do “pé de moleque”; estes grãos estão dissolvidos numa solução solidificada de rapadura, que não é muito dura para efeitos de cominuição, mas, se a solução de ganga fosse em base de mel com clara de ovo (chamada de torrone), a dureza desta “rocha” e a dificuldade para extrair os grãos é maior. Para efeitos práticos, a condição de dura ou mole é da ganga que dissolve a substância e não da substância em si, cujo tamanho de grão faz consumir mais energia não necessariamente pela dureza do grão, mas pela maior dificuldade de liberar a ganga em torno dele.

Yovanovic (1975) participou da execução de testes de dureza para Andesita primária, cujos resultados são mostrados na **Tabela 1.1.2**. Neste caso, o grau de dureza foi medido com base aos procedimentos derivados da abordagem energética (**Bond F.**, 1961), e dimensionado em kWh/ tonelada curta de minério (2000 libras).

Tabela 1.1.2 – Dureza da Andesita Primária (**Yovanovic**, 1975)

Textura da Andesita	Wi, kWh/st
Grossa	12,82
Media	14,35
Fina	15,24

A quase totalidade das abordagens conhecidas, do tipo cinético, avalia a transferência de massa em função da **velocidade de desaparecimento** das partículas de rocha com base na observação de determinadas faixas granulométricas (tamanho), como veremos no **Capítulo 4**, que trata da Cinética da Cominuição. O **Modelo Operacional** optará por avaliar a **velocidade de liberação** da substância **A** do nosso interesse, até atingir o grau desejado, da forma mais seletiva possível com relação à ganga e às outras substâncias (moagem seletiva), e com a menor energia específica possível. O desejável é liberar a substância do nosso interesse ao maior tamanho médio possível do produto moído (**P80**), cominuindo seletivamente as partículas do nosso interesse ao mínimo custo possível.



A velocidade em que as partículas abandonam a fase rocha, ou seja, quando atingem uma determinada combinação entre tamanho/liberação/peso, para serem transportadas como produto, pode ser representada da seguinte forma:

$$N_x = \text{Coeficiente de Transferência} \times \text{Área de Contato} \times \text{Gradiente} \quad (1.7)$$

Onde N_x é o fluxo mássico (massa/tempo)

A magnitude da energia aplicada, com relação à tensão de quebra ou dureza do material, seja por impacto, atrição ou abrasão, é o **Gradiente** que proporciona a força impulsora (diâmetro do moinho, tamanho da bola, por exemplo). O coeficiente de transferência refere-se à velocidade de ocorrência dos eventos de quebra (velocidade de rotação do moinho, por exemplo) e ao tempo disponível para esta aplicação (comprimento do moinho, por exemplo). A Área de contato tem relação com a superfície de encontro entre as partículas e os corpos moedores (tamanho da bola, relação minério/bola, nível de carga do moinho, etc.). Deste modo, a capacidade de cominuição poderia expressar-se da seguinte forma:

$$N_x, \text{ t/h} = K \times A \times \Delta E \quad (1.8)$$

Quase todos os modelos de simulação conhecidos, inclusive o **Modelo Operacional**, apresentam expressões que relacionam estes três termos da equação. No **Capítulo 3** será estudada a entrega de energia, a partir da sua aplicação mecânica ao equipamento e a sua transferência para os meios de moagem.

Algumas primeiras conclusões podem-se observar a partir desta equação básica de transferência de massa por cominuição:

- Muitos pequenos impactos podem equivaler a poucos e grandes impactos. Os moinhos de maior comprimento e menor diâmetro, para uma determinada taxa de alimentação, giram mais rápido (RPM) e durante mais tempo de residência do material;
- Dependendo das características do material, existe um ponto de aplicação de energia, muito acima da tensão de quebra, a partir do qual esta energia é desperdiçada, sem gerar mais “cominuição” das partículas submetidas a esta força. Na prática industrial, tem-se demonstrado que o consumo específico de energia (kWh/t) aumenta junto com o aumento do *diâmetro do moinho*.
- O excesso de corpos moedores (Área) é também uma forma de ineficiência. Deve-se encontrar o *ponto ótimo de relação minério/bola* para aproveitar integralmente a área de contato.

POLPA: FUNÇÃO TRANSPORTE

Já liberadas (ou parcialmente liberadas), as partículas possuem algum grau de mobilidade, devida à heterogeneidade da rocha, por exemplo, no caso de alguns sulfetos, os grãos dirigem-se espontaneamente, pela sua hidrofobia natural, até o ponto de menor contato possível com a água e de menor pressão, ou seja, até a superfície da camada de transporte, em contato com a atmosfera (veremos mais adiante que a adição de reagentes de flotação, dentro do moinho, favorece a seletividade da moagem e, simultaneamente, a seletividade da flotação posterior para determinadas espécies); se os grãos de algumas substâncias fossem mais pesados que outros, as partículas mais ricas destas substâncias tenderão a sedimentar até o fundo do equipamento, na chamada “zona de moagem” (fase rocha), permitindo um maior contato com os corpos moedores (maior seletividade de cominuição) e atingindo um menor tamanho e maior liberação que as outras substâncias. Este mecanismo é definido como “**Classificação Interna**”, e veremos com maior detalhe no item 1.5.3.



O regime ao qual se movimenta a partícula, em qualquer ponto em sentido vertical, dependerá do gradiente de transporte nesse ponto, o qual pode ser maximizado mediante a adição de determinados reagentes químicos ou pela otimização das condições reológicas da polpa, entre outros aspectos.

De maneira similar às operações de separação com concentração de massa, como a Flotação (Yovanovic, 2004), o gradiente proporcionado pela maior liberação dos grãos é a força impulsora que promove a transferência de partículas dentro do equipamento de moagem, propiciando uma maior seletividade da cominuição em favor de determinadas partículas, notadamente aquelas espécies de maior gravidade específica, como veremos em diversos exemplos ao longo deste livro. A utilização de circuitos fechados com elevada carga circulante e o excessivo nível de enchimento de corpos moedores observado em muitas operações industriais de moagem, tende a homogeneizar o processo (e o produto) ao invés de aproveitar esta heterogeneidade em benefício da seletividade e dos menores custos de operação. A operação posterior de separação com concentração (por exemplo, a Flotação, a separação magnética, etc.) possui sua própria medida de eficiência (recuperação) e de seletividade, dependendo do grau de liberação obtido na moagem, de modo que em muitos processos industriais é possível controlar a moagem através da seletividade observada no processo posterior. Este procedimento permite reduzir o trabalho experimental e de medição de variáveis de controle, enlaçando as operações de moagem junto a suas operações seguintes.

Como veremos ao longo do texto, a área que delimita as fases (área da superfície da carga) é fundamental para a seletividade do processo, e esta área é maior em moinhos de alta relação de comprimento em relação ao diâmetro (L/D), ao contrário do observado nas tendências atuais de dimensionamento.

Para a fase polpa definiremos o seguinte mecanismo de transporte:

$$N_x = K_t \times A_t \times (\Phi - \Phi_0) \quad (1.9)$$

Ou seja, a massa que sai da rocha e entra na corrente de transporte depende também de um certo coeficiente de transferência (vazão, diluição), da área superficial da carga interna (que delimita a zona de moagem com a corrente de transporte) e da diferencia relativa de liberação entre o material da rocha e a partícula com maior liberação (por tanto de menor tamanho). Em estado estacionário, tem-se comprovado que existe uma acumulação de massa dentro do moinho, na zona que temos denominado como “zona de moagem”, inserida no valor de \underline{A} , de modo que, para um volume de carga relativamente constante, acontece que:

$$N_x = K \times A \times \Delta E = K_t \times A_t \times (\Phi - \Phi_0) \quad (1.10)$$

Da equação anterior podemos observar que:

- Ao reduzir a intensidade da aplicação de energia, para manter o fluxo N_x é necessário que Φ diminua. Ou seja, o produto ficaria mais grosso. Pelo contrário, o aumento da intensidade de energia ou do coeficiente de transferência (velocidade de rotação, por exemplo) faria aumentar o valor de Φ .
- O aumento de N_x , para a mesma intensidade de aplicação de energia, envolve aumento da área A , via aumento do nível de carga, até o ponto em que é superado o valor máximo da relação minério/bola, fazendo Φ diminuir.
- O aumento do valor de A_t , para o mesmo fluxo de massa, envolve a redução do coeficiente ou velocidade de transferência K_t , tornando o processo mais seletivo.



Qualquer das opções avaliadas envolve também a variável energética, ou seja, deve-se procurar o mínimo consumo específico de energia para o máximo fluxo e máxima liberação, como veremos no **Capítulo 3**. Um resumo dos conceitos anteriores é ilustrado na **Figura 1.1.2**.

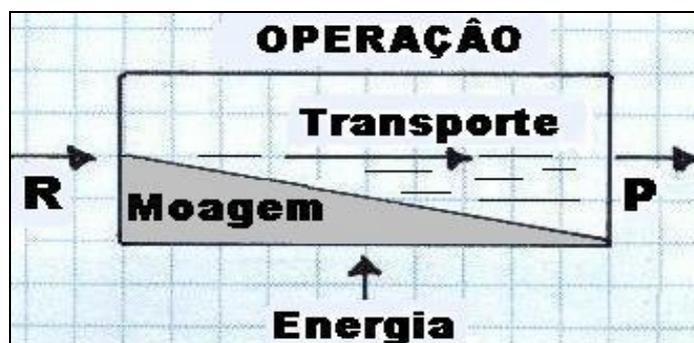


Figura 1.1.2 – Esquema Fenomenológico da Moagem

Equilíbrio e Ponto de Operação

Não existe relação de equilíbrio de transferência de massa entre as fases rocha e polpa, nem metalúrgico (as partículas liberadas não podem retornar para a solução rochosa), nem entálpico (o minério moído não acumula nenhuma carga de entalpia que o faça “condensar” posteriormente, para a fase rocha, ao retirar energia dele). Por outro lado não é possível medir a quantidade líquida de energia recebida pelas partículas, pois as perdas eletromecânicas e por dissipação de energia são muito grandes. A detenção do processo de cominuição é uma decisão de operação que depende da necessidade de liberação da substância ou substâncias do nosso interesse, e este grau de liberação constitui o **ponto de operação** que deve ser definido para dimensionar, operar e controlar o processo.

1.1.6 Índice de Liberação e Distribuição Granulométrica

O grau de liberação da substância do nosso interesse definirá os resultados metalúrgicos, após a cominuição, do processo de separação com concentração de massa que se segue. O processo de moagem será mais ou menos eficiente, tanto nos resultados metalúrgicos como nos custos de produção, na medida da sua aproximação ao ponto de operação definido como ótimo. A produção de excesso de finos, por exemplo, é um exemplo de ineficiência e, além dos maiores custos de moagem é possível que aquele excesso de finos provoque perdas de eficiência nas operações posteriores, particularmente na flotação. O processo de liberação deve ser acompanhado e “operado” de modo de ajustar a Curva de Distribuição Granulométrica para faixas próximas do **P80** definido, evitando excesso de grosso e de superfinos ao redor da malha de referência.

Fuerstenau D.W. (1988) utiliza uma expressão de Gaudin e Schuhmann para caracterizar produtos de moagem:

$$y = (x/x_m)^\alpha \quad (1.11)$$

Onde,

y = fração acumulada de partículas mais finas que x , μm

x_m = P80, μm

α = distribuição de partículas ao redor de vários tamanhos. Normalmente é igual a 0,5, que corresponde ao expoente da 2ª Lei da teoria de Bond para cominuição.



Os Autores demonstram que o principal problema na preparação da polpa que alimenta à flotação é o baixo valor de \underline{a} que resulta dos procedimentos industriais convencionais de moagem. A combinação entre a moagem mais fina e o aumento do valor de \underline{a} para valores superiores que 0,5 devem ser motivo de maiores pesquisas nas operações industriais. A moagem em circuito aberto incrementa o valor de \underline{a} , em comparação com os circuitos fechados.

O grau de liberação da partícula do nosso interesse deve ser avaliada por faixa granulométrica, de acordo com o **Índice de Liberação (Φ)**. As faixas granulométricas consideradas não devem ser muito numerosas, para reduzir o tempo e o custo dos trabalhos experimentais. É efetuado, ao microscópio, um estudo de contagem de grãos sobre seções polidas, para cada faixa granulométrica.

$$\Phi = (\text{Peso da substância livre} / \text{Peso total de substância}) \times 100, \text{ para cada faixa} \quad (1.12)$$

Lin C. L. e outros (1988) introduzem um novo critério de liberação que, considerando como base a avaliação comum em duas dimensões mediante exame de lâminas polidas, os resultados são extrapolados para informação tridimensional (volumétrica). O verdadeiro grau de liberação de uma partícula deve estar baseado na distribuição volumétrica de teores. **Ortega A. e outros** (1987) estudam a flotação de minérios polimetálicos contendo Cobre, Chumbo e Zinco. A modo de exemplo, mostraremos a metodologia utilizada pelos Autores para estabelecer o tamanho ótimo de liberação de Pirita.

Procedimento:

- *Amostra de material é moída a seco até 48 mesh (295 μ m) ou 65 mesh (208 μ m);*
- *A amostra moída é peneirada e separada em faixas granulométricas;*
- *É efetuado, ao microscópio, um estudo de contagem de grãos sobre seções polidas, para cada faixa granulométrica.*

As partículas são separadas, pela contagem, nas seguintes categorias:

1. *Minerais liberados*
 - 1.1 *Grãos liberados de Pirita;*
 - 1.2 *Grãos liberados de sulfetos de Cu, Pb, Zn e Ganga não-pirita.*
2. *Mistos Binários*
 - 1.1 *Mistos de Pirita com outro minério;*
 - 1.2 *Mistos sem Pirita.*
3. *Mistos Ternários (com mais de 3 espécies)*
 - 3.1 *Pirita com outros minérios;*
 - 3.2 *Mistos sem Pirita.*

É comumente assumido que o número de pontos contados é equivalente à área e ao volume presente da substância contada, ou seja: $N = A = V$. Deste modo foi preparado um gráfico de distribuição das espécies liberadas. Deste modo é calculado um Índice de Liberação (Φ) para cada faixa avaliada:

$$\Phi_f = (\text{Peso de Pirita Livre} / \text{Total peso de Pirita}) \times 100, \text{ para cada faixa.}$$

Assim, $\Phi_f = (100L) / (L + 1/2 M_1 + 1/3 M_2)$

Onde, L = Liberada; M1 = Misto Binário e M2 = Misto Ternário.

Os valores calculados são mostrados na Tabela 1.1.3.



Tabela 1.1.3 – Índice de Liberação da Pirita (Ortega A. e outros, 1987)

<i>Faixa, μm</i>	<i>Φ_f (%)</i>
147-208	8,5
104-147	16,5
74-104	46
53-74	60,8
38-53	77,1
28-38	83,6
21-28	89,8
15-21	94,9
10-15	97,8
8-10	98,5

Apesar de tratar-se de valores bastante estimativos, o método introduzido pelos Autores funciona bastante bem em termos práticos e, para o caso do exemplo, foi adotado como Ponto de Operação um P80 de 55 μm para o processo de moagem.

Feitos os cálculos de liberação por faixa, o Índice de Liberação final pode ser calculado multiplicando a proporção de massa retida em cada faixa pela sua liberação, dividindo por 100, como ilustrado no exemplo teórico da **Tabela 1.1.4**.

Tabela 1.1.4 – Exemplo de Cálculo do Índice de Liberação

Faixa, μm	Tempo T₁, min.		Tempo T₂, min.	
	% Massa	Φ_f	% Massa	Φ_f
+ 200	10	20	5	25
150 – 200	20	60	5	65
100 – 150	20	70	25	75
50 – 100	20	80	25	85
20 – 50	10	90	15	95
- 20	20	100	25	100
TOTAL	100	$\Phi = 55$	100	$\Phi = 83,75$

1.1.7 Fenômeno Natural vs. Fenômeno Real

Em muitos processos de beneficiamento mineral a ocorrência do **fenômeno natural** não se encontra representado pela **atuação real** dentro dos processos contínuos industriais. Para o caso da Concentração de Massa por Flotação (Yovanovic, 2004), foi demonstrado que as tentativas de simulação a partir do fenômeno natural de *flotação*, em células de laboratório, têm muito pouca aplicação na usina industrial, onde o processo real é a *concentração de massa* utilizando a flotação. No caso da flotação, o fenômeno natural acontece “para cima”, onde o transporte seletivo e macromolecular de massa, desde a polpa, forma uma *espuma* enriquecida de substância do interesse, mas, em operações contínuas, o *concentrado* é apenas aquela quantidade parcial de espuma efetivamente retirada da célula de flotação. O fenômeno natural é aquele acontecimento observado numa posição de dentro da partícula; o fenômeno real é a observação macroscópica de fora do sistema. O fenômeno natural permite que o processo aconteça, o fenômeno real administra os resultados do fenômeno natural, para que este ocorra da forma mais seletiva e econômica possível.



Para o caso da *cominuição*, que é o fenômeno natural, esta é convertida em fenômeno real (britagem ou moagem, homogênea ou seletiva) mediante a atuação operacional que **administra o fenômeno** de cominuição, principalmente os processos de cominuição seletiva, permitindo obter resultados industriais à maior seletividade e ao menor custo de operação possível.

$$\boxed{\text{FENÔMENO NATURAL} + \text{OPERAÇÃO} = \text{FENÔMENO REAL}} \quad (1.13)$$

A atuação forçada sobre o fenômeno natural, exercida pelo operador da usina, implica muitas vezes num desvio da ocorrência natural do processo, afetando os resultados metalúrgicos. A modelagem matemática desses fenômenos apresentará sérias dificuldades na sua projeção industrial se ela for baseada apenas no fenômeno natural.

A utilização de energia nas operações de cominuição é um outro aspecto que deve ser levado em conta de forma simultânea aos mecanismos físicos da cominuição, como são a velocidade de liberação, a função transporte e a seletividade do processo, no caso de materiais heterogêneos, criando mais um elemento complicador frente às abordagens que pretendem acompanhar apenas o fenômeno natural de cominuição. Como veremos ao longo do texto, o modelo proposto em geral para as operações de beneficiamento, o **Modelo Operacional**, recebe este nome justamente por considerar as atuações do operador dentro das equações do modelo. Desse modo, o fenômeno real das operações unitárias de beneficiamento mineral possui dois componentes: **Natural** e **Operacional**. Este último não tem sido considerado adequadamente, até hoje, pelas atuais abordagens teóricas de ensino e pesquisa dessas operações nem pelos modelos de simulação conhecidos.

A expressão utilizada ao longo deste texto será:

$$\text{COMINUIÇÃO} + \text{OPERAÇÃO} = \underline{\text{MOAGEM HOMOGÊNEA}} \quad (1.14a)$$

$$\text{COMINUIÇÃO} + \text{OPERAÇÃO} + \text{CLASSIFICAÇÃO INTERNA} = \underline{\text{MOAGEM SELETIVA}} \quad (1.14b)$$

As operações de britagem são geralmente de tipo homogêneo, com a exceção da britagem por impacto, normalmente em britadores de martelos, que consegue evidenciar a heterogeneidade de determinados minérios, permitindo separar substâncias mais duras nas frações mais grossas (por exemplo, a magnetita) de outras espécies de menor dureza, gerando uma pré-concentração da espécie do nosso interesse. Deste modo, definiremos a britagem por impacto como uma operação de cominuição seletiva.

Como veremos em capítulos posteriores, podemos considerar como variáveis atribuíveis ao minério aspectos tais como os tamanhos de alimentação e de produto desejados (em função do grau de liberação), o peso específico das substâncias presentes, o grau de heterogeneidade do minério, a dureza da ganga e o tamanho dos grãos, etc. Por sua parte, a “administração” da cominuição possível de ser atingida envolve, para o fenômeno real de *moagem*: características do equipamento (velocidade de rotação, diâmetro, tipo de revestimentos, etc.), dos corpos moedores (tipo, tamanho, material) e decisões de operação como a porcentagem de sólidos da polpa, o nível de enchimento de corpos moedores e a porcentagem de carga circulante (no caso de utilizar o circuito fechado), entre outros aspectos.



1.1.8 Cominuição Seletiva com Transferência Macromolecular de Massa

*Utilizando los conceptos expuestos anteriormente, en la visión del **Modelo Operacional**, definiremos el proceso de molienda de partículas heterogéneas como una operación unitaria de conminución selectiva con transferencia macromolecular de masa. Ese proceso tendrá cuatro **mecanismos macroscópicos**: Liberación (en el contexto cinético, como Velocidad de Liberación, y en la distribución de la quiebra, como ilustrado en la Tabla 1.1.1), Función Transporte, Selectividad y Aplicación de Energía, y el modelo utilizará el **Índice de Conminución** (desarrollado por el modelo para establecer las relaciones de scale-up) como propiedad macrofenomenológica para el estudio, diseño, operación y optimización del proceso. El proceso real de molienda, en procesos continuos industriales, considerará también los sub-mecanismos de conminución y de clasificación interna, y los sub-procesos de transporte macromolecular de masa en estado estacionario y la clasificación externa, en el caso de los circuitos cerrados. La Operación entra como elemento clave e innovador del Modelo Operacional y permite relacionar de manera optimizada todos los mecanismos anteriores.*

Utilizando-se dos conceitos expostos anteriormente, na visão do **Modelo Operacional**, definiremos o processo de moagem de partículas heterogêneas como uma operação unitária de cominuição seletiva com transferência macromolecular de massa. Esse processo terá quatro **mecanismos macroscópicos**: *Liberação* (no contexto cinético, como *Velocidade de Liberação*, e na distribuição da quebra, como ilustrado na tabela 1.1.1), *Função Transporte*, *Seletividade* e *Aplicação de Energia*, e o modelo utilizará o **Índice de Cominuição** (desenvolvido pelo modelo para estabelecer as relações de scale-up) como *propriedade macrofenomenológica* para o estudo, dimensionamento, operação e otimização do processo. O processo real de moagem, em processos contínuos industriais, irá considerar também os sub-mecanismos de *cominuição* e de *classificação interna*, e os sub-processos de *transporte macromolecular* de massa em estado estacionário e a *classificação externa*, no caso dos circuitos fechados. A *Operação* entra como elemento chave e inovador do Modelo Operacional, e permite relacionar de forma ótima todos os mecanismos anteriores.

1.1.8.1 Os Mecanismos Macroscópicos da Cominuição

1. Liberação

Dependendo da heterogeneidade, da dureza e da textura dos grãos das substâncias do nosso interesse, com este primeiro componente, torna-se possível estudar e simular o fenômeno de **cominuição natural** (ou apenas "cominuição", como é normalmente enfrentado pela literatura convencional). Nesta fase, a cominuição pode ser estudada em analogia com um processo de destilação fracionada, onde partículas são transferidas da solução rochosa para a polpa, em forma de partículas com diversos graus de liberação, mediante a aplicação de energia. O **Modelo Operacional** propõe a determinação de Φ mediante a utilização dos procedimentos indicados no item 1.1.4, para moagem de minérios heterogêneos, representados na equação 1.5 e, ainda, explicado no exemplo do item 1.1.6 (Tabelas 1.1.3 e 1.1.4), como elemento macroscópico para o estudo deste mecanismo. O grau de liberação da partícula do nosso interesse deve ser avaliada por faixa granulométrica, de acordo com o **Índice de Liberação** (Φ). As faixas granulométricas consideradas não devem ser muito numerosas, para reduzir o tempo e o custo dos trabalhos experimentais. É efetuado, ao microscópio, um estudo de contagem de grãos sobre seções polidas, para cada faixa granulométrica.

$\Phi = (\text{Peso da substância livre} / \text{Peso total de substância}) \times 100$, para cada faixa.



A Liberação acontece numa determinada velocidade, a **Velocidade de Liberação**, da forma ilustrada na **Figura 1.1.3**, e que é estudada no contexto cinético do fenômeno, no **Capítulo 4**.

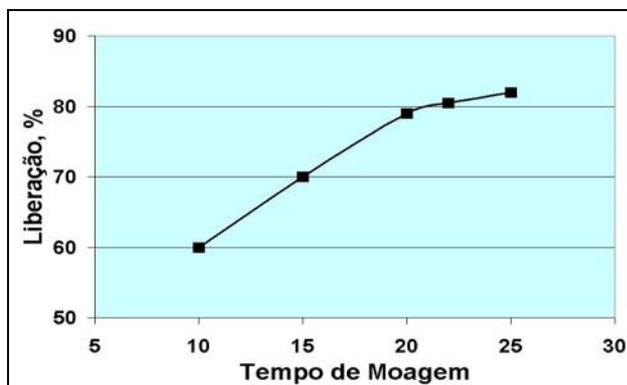


Figura 1.1.3 – Velocidade de Liberação (Exemplo Teórico)

O produto da cominuição possui uma certa **distribuição de quebra**, como ilustrado na tabela 1.1.1, cujos fragmentos individuais gerados por cada evento de quebra são diferentes do fragmento que os originou, e diferentes entre si.

Os sistemas cinéticos convencionais avaliam a quebra com base na velocidade de desaparecimento das partículas desde as diversas faixas de tamanho para os tamanhos inferiores (Função Seleção) e a distribuição da quebra por cada evento é estabelecida analiticamente como uma matriz (matriz Quebra), que caracteriza a geração de fragmentos, considerando o processo como sendo homogêneo, levando em conta apenas o tamanho das partículas e considerando que os fragmentos gerados possuem características análogas entre si e com as partículas maiores que as geraram.

Nos capítulos seguintes veremos que a cominuição das partículas requer de bastante tempo de ação massiva dos corpos moedores sobre a massa de rocha situada na “zona de moagem” (zona mais baixa do volume interno do moinho, entre 20 a 25% em volume, onde existe uma sedimentação de partículas mais grossas, pesadas e de maior gravidade específica, constituindo a fase rocha interna, R_i). Quanto maior for o tempo de moagem mais fino e mais liberado irá ficar o produto. Para operações industriais, em moinhos operando em circuito aberto, podem-se observar tempos de residência da rocha, e por tanto de moagem, superiores que 30-40 minutos nesta zona (Velocidade de Liberação).

2. **Função Transporte**

A retirada oportuna do produto, mediante certa velocidade e seletividade, permite utilizar a energia com mais eficiência sobre as partículas que precisam realmente ser cominuidas. A retirada de produto pronto, que constitui o mecanismo da **função transporte**, não deve exceder de 10 a 13 minutos, dependendo de diversas variáveis, como o valor de P80 procurado e a gravidade específica das partículas, dentre outros aspectos. Acima deste tempo, a zona de moagem e o moinho em geral começam a acumular finos, o qual prejudica a reologia da polpa, reduzindo a mobilidade dos corpos moedores e criando efeitos de amortecimento entre as partículas (pelo enchimento de finos entre os espaços), diminuindo o mecanismo principal de quebra e liberação.

Na **Figura 1.1.4** se ilustra o efeito do tempo de moagem sobre o consumo específico de energia, na experiência “batch”, a seco, característica dos testes que definem a propriedade macrofenomenológica dos modelos de tipo *Energético* (teste de Bond).



Como se observa na Figura 1.1.4, pela falta da função transporte (ela acontece apenas nos processos contínuos), a acumulação de finos começa a prejudicar o processo á partir de 10 a 13 minutos.

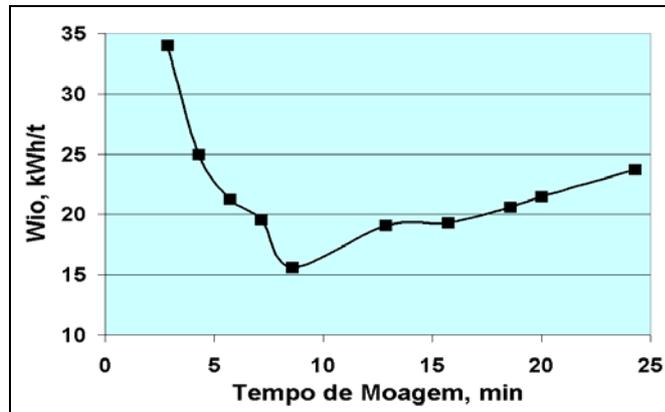


Figura 1.1.4 – A Moagem sem a “Função Transporte”

3. Seletividade

O gradiente proporcionado pela maior liberação dos grãos, que evidencia e maximiza determinadas diferenças de propriedades entre as substâncias, é a força impulsora que promove a transferência de partículas dentro do equipamento de moagem (*classificação interna*), propiciando uma maior seletividade da cominuição em favor de determinadas partículas, notadamente aquelas espécies de maior gravidade específica. A operação posterior de separação com concentração (por exemplo, a Flotação) possui sua própria medida de seletividade, dependente do grau de liberação obtido na moagem, de modo que é possível controlar a moagem através da seletividade observada no processo posterior.

A Seletividade é a propriedade do processo que define a operação de **cominuição seletiva**, cujos detalhes serão analisados no **Capítulo 2**. O Modelo Operacional propõe a utilização da **Curva de Seletividade** como elemento macroscópico para o estudo deste mecanismo, o qual pode ser observado em função da aplicação de energia (E vs. Φ) ou da redução de tamanho ($P80$ vs. Φ), da forma ilustrada na **Figura 1.1.5**, onde a curva superior reflete uma operação mais “seletiva” pois atinge o mesmo grau de liberação por um maior $P80$. Para o caso de materiais homogêneos ou quando a cominuição não tenha objetivos de separação com concentração, este mecanismo não precisa ser levado em conta nos procedimentos experimentais.

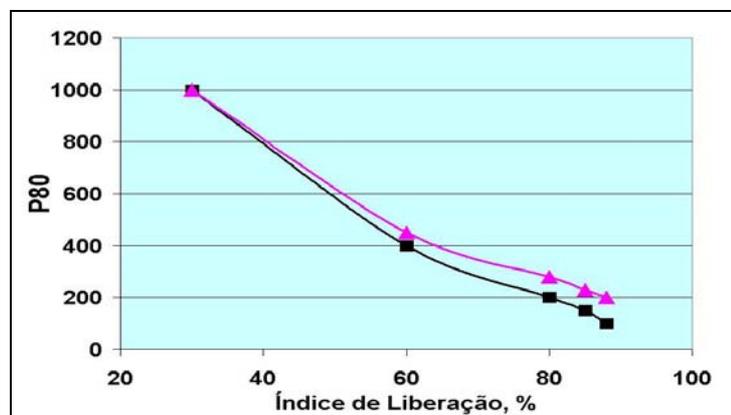


Figura 1.1.5 – Curva de Seletividade P80 vs. Φ



4. Aplicação de Energia

A energia é entregue mecanicamente através do pinhão e é convertida, pelo movimento de rotação do cilindro, em *energia massiva de cominuição*, onde uma somatória de efeitos de Impacto, Atrição e Abrasão proporcionam a quebra com liberação da substância de nosso interesse. A energia pode ser entregue ao material de forma mais ou menos eficiente, dependendo das características mecânicas do equipamento (geometria, velocidade) e da sua operação (% de sólidos, nível de enchimento de corpos moedores, tipo de corpo moedor, etc.). Estes aspectos serão estudados em detalhe no **Capítulo 3**.

Os modelos do tipo *energético* lidam bastante bem com a formulação da aplicação mecânica de energia, ao ponto que até hoje são utilizadas estas abordagens para o dimensionamento de equipamentos para projeto. A grande vantagem destes modelos é sua consagrada aplicação industrial, há mais de 40 anos, e sua sólida base experimental, relacionada com operações contínuas. A desvantagem desta abordagem não é apenas a sua falta de fundamentação científica como operação unitária, mas a quase nenhuma flexibilidade quando os parâmetros (paradigmas) que sustentam os cálculos são mudados, como é o caso do circuito aberto, o baixo enchimento de corpos moedores, mudanças de velocidade e outros aspectos.

Ao longo do texto poderemos confirmar alguns importantes critérios energéticos:

- É mais barato britar que moer.
- É preferível esgotar o sub-mecanismo de impacto na britagem, antes de entrar nas operações de moagem, onde o custo da produção do impacto é maior. Particularmente para minérios heterogêneos, a britagem por impacto permite também a separação oportuna de partículas ou substâncias indesejadas pelo processo (pré-concentração), como por exemplo, a retirada oportuna de magnetita grossa e de superfinos, antes de entrar nas etapas posteriores.
- *Definir* exatamente a necessidade de cominuição; como é o material, para que se precisa cominuir, qual é o processo que segue, etc. *Dimensionar* o equipamento. *Otimizar* o circuito (operação) já na etapa de projeto.
- A cominuição é geralmente uma etapa de preparação para os processos que se seguem, notadamente os processos de separação com concentração de massa.

1.1.8.2 A Propriedade Macrofenomenológica

Uma determinada quantidade de contatos entre corpos moedores e minério, por unidade de força, permite que o material seja cominuído até um tamanho definido, que corresponderia ao grau de liberação desejado. Dentro de certos limites, poucos contatos, mas de grande força, podem equivaler a muitos contatos de menor intensidade (o diâmetro do moinho, por exemplo, é uma variável que atua neste sentido). Dependendo do tempo de residência das partículas e das condições operacionais, definindo-se a quantidade mais provável de contatos entre os corpos moedores e o material e a intensidade deste contato, o **Modelo Operacional** introduz o **Índice de Cominuição** (Yovanovic e Moura, 1991, 1993), que será detalhado no item 1.7, e que leva em conta os fenômenos auxiliares de transporte e de classificação. O Índice de Cominuição é a ferramenta utilizada para o scale-up com operações industriais, e permite relacionar a aplicação mecânica de energia ao moinho e as formas como esta energia é entregue ao minério, de modo que a forma otimizada pode ser devidamente definida para cada caso estudado.



1.2 O Estado da Arte

1.2.1 Fundamentos da Cominuição

Debido a la complejidad de esa operación y por la falta de una "ciencia mineral" que le pueda dar amplia cobertura (como son los Fenómenos de Transporte, que cubren las operaciones unitarias de la ingeniería química), su desarrollo científico ha avanzado de manera fragmentada (modelos cinéticos, modelos energéticos, manuales de fabricantes de equipos, etc.), como una sumatoria de conocimientos, propaganda comercial y conclusiones experimentales aisladas, sin espina dorsal y con poca relación cuantitativa entre ellos. En este ítem tentaremos analizar, brevemente, los contextos microscópicos y macroscópicos que las actuales interpretaciones teóricas del proceso han permitido, o sea, la visión convencional de la conminución, con la cual el lector debe estar más familiarizado.

Devido à complexidade dessa operação e pela falta de uma "ciência mineral" que lhe possa dar ampla cobertura (como são os Fenômenos de Transporte, que cobrem as operações unitárias da engenharia química), o seu desenvolvimento científico tem avançado de maneira fragmentada (modelos cinéticos, modelos energéticos, manuais de fabricantes de equipamentos, etc.), como uma somatória de conhecimentos, propaganda comercial e conclusões experimentais isoladas, sem espinha dorsal e com pouca relação quantitativa entre eles. Neste item tentaremos analisar, sucintamente, o contexto macroscópico que as atuais interpretações teóricas do processo têm permitido, ou seja, a visão convencional da cominuição, com a qual o leitor talvez esteja mais familiarizado.

A estrutura geral do modelo de processos na área de tratamento de minérios deve considerar, como fundamental, uma descrição ou representação do fenômeno principal do processo e das operações unitárias ou fenômenos auxiliares envolvidos no sistema (classificação, transporte, etc., no caso da moagem). O fenômeno principal pode ser descrito através das seguintes abordagens:

- *Modelos Microfenomenológicos*, que se prestam à representação química ou física.
- *Modelos Estatísticos ou Empíricos*, que são feitos a partir da regressão de uma série de experimentos que não descrevem o fenômeno ou processo em si, mas apenas consideram os resultados deste processo.
- *Modelos Macrofenomenológicos*, que descrevem alguma performance do processo. Este tipo de expressão é derivado de algum fundamento teórico, mas suas constantes são determinadas experimentalmente, por exemplo: leis cinéticas, curvas de separação, distribuição de tempo de residência, etc.

Os modelos conhecidos no processo de cominuição, voltados à moagem em moinhos tubulares, são do tipo macrofenomenológicos, os quais podem, por sua vez, serem classificados como "**Energéticos**" (detalhes no **Capítulo 3**) ou "**Cinéticos**", (detalhes no **Capítulo 4**). O **Modelo Operacional** foi desenvolvido como nova alternativa macrofenomenológica para o modelo de diversos processos, assumindo o sistema fenomenológico como sendo de *Transferência Macromolecular de Massa*. O fenômeno fundamental da moagem (cominuição em moinhos) pode-se dividir em três partes principais: **Impacto** - quebra da partícula por golpes, normalmente de força superior à necessária; **Atrição** - forças de pressão localizadas, e **Abrasão** - esfregação de partículas entre si ou com peças de aço. O processo de moagem seletiva, como sistema, envolve principalmente três funções simultâneas: a própria **cominuição** - que é o fenômeno fundamental - a **classificação interna** e o **transporte macro - molecular**, além do sistema de **aplicação da energia**.



Na **Figura 1.2.1** é ilustrado um esquema das etapas de cominuição normalmente consideradas nas usinas de beneficiamento. O objetivo é de destacar a utilização de processos seletivos de cominuição, segundo as características dos minérios e objetivos finais da usina.

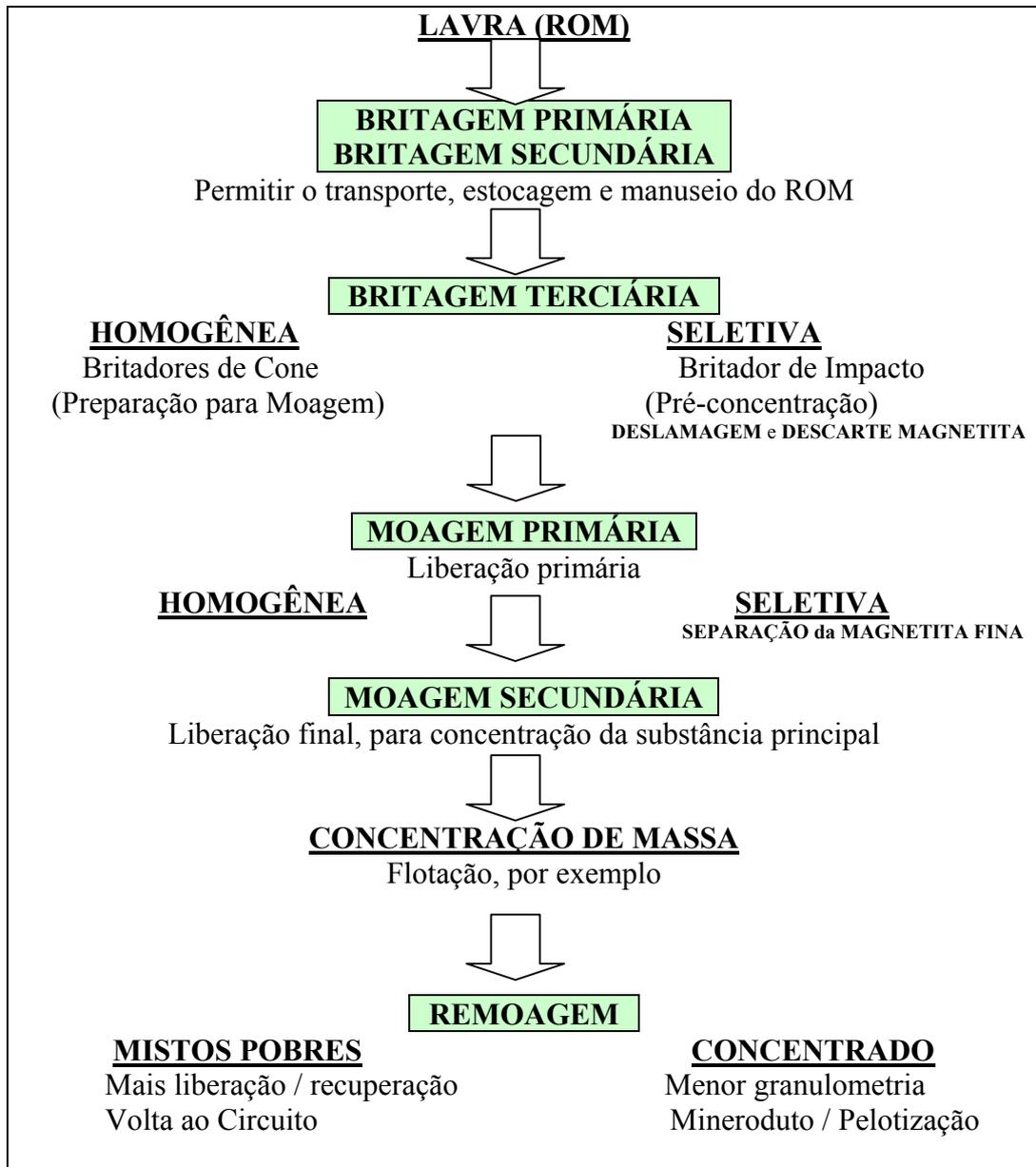


Figura 1.2.1 – Esquema das Etapas de Cominuição

Na **Tabela 1.2.1** é apresentado um resumo dos sistemas de moagem mais conhecidos. O sistema de moinhos tubulares de barras e de bolas é chamado de sistema *convencional*, para ser diferenciado dos sistemas *autógenos*. Os moinhos a úmido, tubulares, descarga por *overflow* e de bolas, são os mais utilizados no sistema convencional, é constituem o alvo principal deste texto. A liberação das espécies minerais é a operação unitária de maior relevância prática em todo circuito de processamento de minérios; pois demanda o principal investimento de capital, incide fortemente nos custos unitários do processo metalúrgico, determina a capacidade máxima de tratamento e influi na rentabilidade da operação.



Tabela 1.2.1 – Sistemas Clássicos de Moagem

TIPO	PRODUTO	MEIO DE MOAGEM
Seco (tipo Aerofall) Úmido – Cascade (L/D < 1) – Tubular (L/D > 1) Descarga – Por Overflow – Por Diafragma	- Grosso (Primário) - Fino (Secundário) * Opção de <i>Single-Stage</i> para as duas etapas - Superfino (Remoagem, Pelotização)	- Totalmente Autógeno - Parcialmente Autógeno (Pebbles) - Semi-Autógeno (4 a 8% de bolas) - Barras - Bolas (vários tipos) - Cylpebs, bolas de porcelana, etc.

1.2.2 Evolução Tecnológica (e comercial) da Cominuição

Período 1900 – 1950

Quando ainda não se pensava na fabricação de corpos moedores de aço, os sistemas autógenos ⁽¹⁾ de moagem já eram notícia, **H.W. Hardinge** publicou as características técnicas do processo na Revista AIME Transactions, em Outubro de 1908. Em verdade, já em 1906 diversas empresas sul-africanas produtoras de Ouro começam a moer os seus minérios mediante moinhos tubulares em sistema autógeno. É importante registrar estas datas para comprovar que este tipo de cominuição não é uma novidade tecnológica destes tempos.

Nas operações de *britagem*, o britador de mandíbulas é o mais comum, próprio de usinas de baixa capacidade, numa época em que o tamanho das instalações não era tomado pelo gigantismo de hoje, em que os mercados estão mais globalizados e a economia de escala parece necessária (ainda considerando o menor teor das jazidas exploradas). Mesmo assim, se têm notícias de britadores giratórios naquela época. Na escala industrial, as operações de britagem, em geral, não conseguem atingir produtos inferiores que $\frac{3}{4}$ de polegada, como tamanho de alimentação às operações de moagem, que na época possuíam pequeno diâmetro (8 a 10 pés), de modo que estas últimas operações precisam de uma etapa de moagem primária, antes da moagem que alimenta os processos de concentração. Pelas dificuldades de fabricação estrutural dos equipamentos, e pelo tamanho dos motores, a *moagem* convencional se concentra em moinhos de pequeno porte, e operando em dois estágios, pelo motivo da produção ainda grossa dos britadores. A operação auxiliar de classificação é normalmente feita por classificadores de arraste e a carga circulante retomada por elevadores de canecos. A modo de exemplo, pode-se citar que o concentrador Sewell da Empresa Minera El Teniente, Chile (**Yovanovic**, 1975-1976) instalou, durante os anos 40, 10 britadores e 72 moinhos para processar 30.000 t/dia de minério sulfetado de Cobre.

Década de 50

Aparecem no mercado os britadores de cone tipo Symons (*Standard e Short Head*). O produto da britagem já consegue ser inferior que $\frac{3}{4}$ de polegada, contribuindo para melhorar a eficiência dos equipamentos de moagem. Na moagem convencional permanece a tendência de utilizar dois estágios: barras e bolas. Os moinhos primários de barras, devido à resistência mecânica das barras em relação ao seu comprimento, atingem a sua potência máxima próxima de 1.800 HP. São introduzidos os hidrociclones e as bombas centrífugas no fechamento dos circuitos.

(1) Como o nome indica, trata-se do sistema de moagem que utiliza o mesmo minério como meio de moagem.



É desenvolvido o modelo energético de moagem por **F. Bond**, introduzindo o *Work Index* (W_i) como propriedade macrofenomenológica da cominuição. Este modelo é amplamente aceito e até agora é o utilizado no dimensionamento de equipamentos de moagem. A fabricação de moinhos convencionais apresenta uma grande concorrência entre diversas fábricas: Hardinge, Marcy, Denver, Nordberg, Allis-Chalmers, entre outras, com base principal nos EEUU. Estratégias de desenvolvimento regional dos países escandinavos (Finlândia, Noruega e Suécia) fazem criar e desenvolver uma cultura tecnológica local, desistindo da compra de equipamentos convencionais e desenvolvendo a tecnologia de moagem Auto-Peb (Autógena modificada, ou de Pebbles – que utiliza corpos moedores, de certa condição de tamanho e peso, derivados da seleção de fragmentos do próprio minério, nas operações de britagem anteriores). Este sistema foi implantado em todas as instalações industriais da área, particularmente nas empresas dos grupos BOLIDEN e OUTOKUMPU.

Década de 60

A britagem continua evoluindo em benefício dos sistemas convencionais. O desenvolvimento do sistema “*High Energy*” para controle de potencia dos britadores *short-head*, permite aumentar a capacidade destes equipamentos e reduzir, nas operações industriais, o tamanho do produto britado para menos de ½ polegada. Aproveitando esta menor granulometria, aparecem no mercado os circuitos de moagem “*single-stage*”, que utilizam moinhos convencionais de maior tamanho, em circuito fechado, em estágio único. É iniciado o sistema de controle automático dos moinhos, utilizando o densímetro nuclear, maximizando a capacidade dos circuitos de moagem. O benefício desta evolução tecnológica em favor das empresas produtoras foi tão grande que, a modo de exemplo, citamos o fato que a Empresa El Teniente, Chile, instalou mais um concentrador (Colon), com aproximadamente a mesma capacidade do concentrador anterior (Sewell), com apenas 4 britadores Symons (2 *Standard* e 2 *Short-head*) e 7 moinhos de bolas *single-stage*, de 14 x 24 pés.

Junto com o aparecimento de fábricas locais em países produtores e a queda das vendas nas fábricas tradicionais, floresce uma forte ofensiva de grupos multinacionais, com base no Canadá, com forte apoio governamental, pela comercialização de “tecnologias” e não necessariamente de equipamentos padronizados, optando pelo caminho das patentes. Nasceram assim as patentes dos moinhos autógenos e semi-autógenos a úmido Cascade-Mill (moinhos de grande diâmetro, com relação $L/D < 1$), dos moinhos autógenos e semi-autógenos a seco Aerofall, e da Flotação em Coluna, entre outras tecnologias. O argumento de venda dos sistemas semi-autógenos baseou-se (na época) na suposta economia no consumo de energia elétrica frente aos sistemas convencionais (suposição que na prática industrial é comprovadamente inversa). Na moagem de minérios de Ferro e de Ouro começa a popularizar-se esta opção tecnológica. Nos Estados Unidos, fabricantes de menor porte, de equipamentos convencionais, se unem em grandes corporações.

Para minérios sulfetados, as empresas do grupo Kennecott (EEUU) efetuam experiências de moagem autógena e semi-autógena em suas usinas produtoras de Cobre: Utah, Nevada, Chino, Ray e Tam. Os testes incluíram confirmações em escala industrial, durante mais de 5 anos. O sistema convencional de moagem não conseguiu ser superado. A década termina com a impressão de que novas evoluções na cominuição convencional poderiam favorecer, ainda mais, o esquema de custos de investimento e operação das empresas mineradoras, e estimular o desenvolvimento sustentado das fábricas locais de equipamentos convencionais, nos países produtores de matérias primas.



Década de 70

Aparecem os sistemas hidráulicos para o ajuste dinâmico de “*closed-setting*” e o sistema de *super high-energy* nos britadores short-head, permitindo um produto britado menor que 3/8 de polegada (8 a 10 mm), favorecendo ainda mais os circuitos de moagem convencional. Por sua parte, os circuitos single-stage são novamente otimizados pela incorporação do PSM (Particle Size Monitor), como elemento de comando do sistema de controle automático. Foram observados incrementos de 2% de maior capacidade de produção (El Teniente, 1975 – Instalação do primeiro PSM de América Latina).

Com relativo sucesso na *predição do consumo de energia*, a partir das experiências piloto (scale-up), foi implantada a moagem semi-autógena para o projeto Cyprus Pima, EEUU (Cobre). Esta instalação dá início a uma enorme ofensiva publicitária em favor dos sistemas semi-autógenos. Centenas de artigos técnicos foram publicados em favor desta novidade, em revistas de circulação e em Congressos de mineração, tendo o projeto Cyprus Pima como carro-chefe. Nesta estratégia foi comentado o sucesso do *scale-up*, mas não foram devidamente divulgadas as desvantagens desta tecnologia, que para este projeto significou maior consumo energético que o sistema convencional e consumo de aço 25% maior que o projetado. Nos anos 70 diversos outros sistemas autógenos e semi-autógenos foram implantados e muito pouco foi falado dos enormes problemas que estas instalações causaram às empresas produtoras. Só na moagem de minério de Cobre, observou-se que diversas usinas projetadas para operar de maneira totalmente autógenas tiveram que voltar a operar com bolas de aço como corpos moedores. Nos Estados Unidos, três empresas voltaram para moagem convencional após ter sido projetadas e implantadas em sistema autógeno: Butte (da Anaconda), Twin Buttes (Anamax) e C.E. Weed (Anaconda). No Canadá, as usinas de Similkameen e Island Copper foram projetadas para operar de forma autógena, numa etapa, e tiveram que mudar para sistema semi-autógeno, e ainda com novos moinhos de bolas para a moagem secundária, obviamente não considerados na etapa de projeto quando, comparativamente, foi descartado o sistema convencional em benefício da nova tecnologia.

A prática industrial comprovou que o consumo específico de energia é sempre maior nos sistemas autógenos ou semi-autógenos em relação aos sistemas convencionais. Além disso, quase todas as usinas industriais de moagem autógena ou semi-autógena apresentaram entre 10 a 20% a mais de consumo específico de energia quando comparado com os valores previstos na etapa de projeto, onde estes custos são favorecidos mediante a aplicação do método do *net-power*, que executa o scale-up para a escala industrial com a mínima energia possível. A alternativa convencional é severamente penalizada com uma série de fatores de correção, cargas circulantes, etc, configurando um quadro em que raramente aparece um projeto onde a alternativa convencional resulta-se ganhadora. (nas operações de flotação acontece o mesmo com as células de coluna frente às células convencionais). Ainda nos anos 70, já comprovado o maior consumo energético dos sistemas semi-autógenos, a estratégia comercial destes grupos passa agora a insistir nos menores investimentos no sistema de cominuição como um todo (britagem + moagem), onde também as usinas convencionais de britagem são sempre penalizadas com projetos superdimensionados, principalmente na estimação de obras civis (silos, prédios, etc.) e equipamentos auxiliares. A ofensiva comercial teve tal sucesso que neste período foi mais do que duplicada a quantidade de moinhos autógenos, semi-autógenos e de pebbles em operação e, a começos dos anos 80, existiam 378 moinhos operando em todo o mundo, como mostrado na **Tabela 1.2.2**. Na **Figura 1.2.2** é mostrada a evolução da instalação dos moinhos “Cascade Mill”.



Tabela 1.2.2 – Instalações não Convencionais de Moagem
(levantamento de **A.P.Yovanovic**, 1983)

PERIODO	MOINHOS
1900 – 1973	
• Canadá e EEUU	96
• África do Sul	63
• Finlândia	14
• Suécia	13
• Libéria	<u>01</u>
Sub-total até 1973	187
1973 - 1983	191
TOTAL ATÉ 1983	378

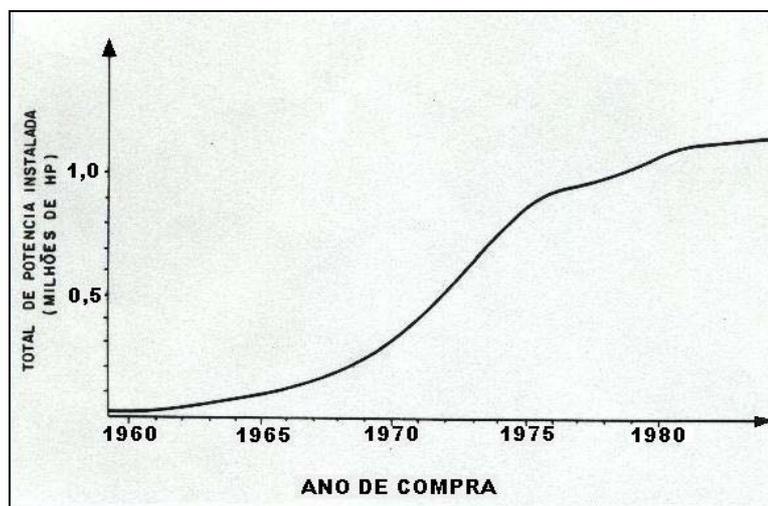


Figura 1.2.2 – Venda de Moinhos Cascade Mill (Jones Jr., 1983)

Década de 80

A fábrica Nordberg, na época uma das últimas fabricantes de equipamentos convencionais em atividade, avança mais um passo na britagem convencional, patenteando o britador short-head do tipo “*Water-Flush*”, o qual, operando em circuito aberto, brita a úmido (65 a 70% de sólidos), favorecendo a seletividade desta operação e entregando uma polpa pronta para moer ou para pré-classificar antes de alimentar á moagem. Na Alemanha, começam a ficar populares os britadores de rolos a pressão (adequados para materiais mais homogêneos).

Nos congressos da época é feita uma grande divulgação do fracasso dos moinhos convencionais do projeto Bouganville, Nova Guiné (ao nosso entender o equipamento foi mal dimensionado e a velocidade de rotação ficou muito elevada), cujos moinhos, de 18 pés de diâmetro, apresentaram maior consumo de energia que o esperado a partir das experiências de laboratório. Em compensação, muito pouco foi falado do sucesso do projeto Pinto Valley (EEUU), com moinhos do mesmo diâmetro. A pressão comercial dos sistemas Semi-Autógenos vence a resistência dos países latino-americanos, cujas fábricas locais mais importantes foram adquiridas por grupos multinacionais e pararam de divulgar os sistemas convencionais de moagem.



O primeiro moinho do tipo Cascade Mill da América Latina foi instalado em Disputada, Chile (1981) instalação esta que somente encontrou alguma justificativa pelas dificuldades topográficas e climáticas que, na opinião dos responsáveis pelo projeto, complicariam a instalação de sistema convencional de britagem naquele local (**Von Borries e Villanueva**, 1981). Em nível operacional, o sistema semi-autógeno apresentou maiores custos de operação que a velha usina convencional existente. Além disso, a usina de flotação teve uma queda de 2% de recuperação por causa do novo sistema de moagem, provavelmente por causa da maior granulometria do produto nas novas instalações.

No final dos anos 80, a empresa El Teniente (Chile), com frágeis argumentos técnico-econômicos (**Vivanco e Barrat**, 1987), instala o maior moinho semi-autógeno do mundo, para aquela época, de 36 pés de diâmetro e 15.000 HP de potência instalada, alegando maior flexibilidade e leves melhorias de custos de investimento e operação em relação ao processo convencional existente, condição esta que parece não ter sido confirmada na prática, ao ponto que o aparelho publicitário pro Cascade Mill não tem falado nada ao respeito. A situação econômica mundial interrompe o andamento de numerosos projetos. O preço real da energia elétrica sobe mais de 100%, desfavorecendo, ainda mais, os sistemas não convencionais de moagem (**Motz J.C.**, 1982). **MacPherson** (1989) reporta valores de US\$5/kWh para o Canadá e EEUU. Lembramos ao Leitor que o projeto de Cyprus-Pima, avaliado durante os anos 1969 (projeto) e 1972 (start-up), considerava apenas 1 centavo de dólar por kWh.

Década de 90 até Hoje

A globalização e o gigantismo dos mercados, principalmente pelo crescimento da China, motivou um rearranjo nas estruturas societárias das empresas mineradoras, em nível mundial; na falta de novos investimentos, o mesmo capital mudou diversas vezes de mãos. Os grandes fabricantes seguiram a mesma tendência, e hoje apenas um grande grupo controla 90% do mercado de equipamentos de mineração, em geral (talvez o 100% dos equipamentos de cominuição). No meio entre poucas e enormes corporações produtoras e um único fabricante, não existe muito espaço para os engenheiros projetistas locais nem para avaliações técnicas isentas de pressão comercial; os donos das empresas são anônimos dentro de sociedades do mesmo nome, e a compra de equipamentos e os custos de operação não doem tanto no bolso das personas que decidem. É um campo fértil para a introdução da tecnologia global.

Engenheiros eletrônicos, sem necessidade de possuir conhecimentos sobre processos, fabricam, comercializam e instalam sistemas de controle chamados de *otimizantes*, onde as atividades da “engenharia de processo” ficam escondidas dentro da memória neural de um aparelho eletrônico. O sistema irá utilizar todas as regras práticas dos técnicos (*expert-system*) e os “macetes” dos operadores (*fuzzy logic*) e não devolverá nenhum conhecimento em troca, pois ele não responde, limitando a atuação dos *engenheiros de processo* ao simples acompanhamento de dados de produção. Os *engenheiros de projeto* da área mineral também perdem espaço, pois, além das mineradoras deixarem os “cálculos” de dimensionamento para os próprios fabricantes, estão chegando os projetos “chave-em-mão” conveniados entre o único sistema multinacional de comercialização de equipamentos e as poucas grandes corporações produtoras.

Após quase 100 anos a cominuição continua sendo uma arte para os operadores, um desafio científico para os pesquisadores (ainda sem soluções práticas para as operações industriais) e um excelente negócio para os fabricantes.



1.2.3 Modelos de Cominuição

Basicamente, qualquer modelo teria que criar um sistema de equações que levem em conta: as características do minério (dureza, distribuição granulométrica, etc.), do equipamento (potência aplicada, diâmetro, velocidade de rotação, etc.) e o mais complicado, a maneira como estes dois elementos se combinam dentro do moinho (operação). Este sistema de equações busca quantificar o modo pelo qual o minério recebe a energia aplicada ao sistema. Existe um ponto na relação "*energia aplicada na moagem vs. energia recebida pela cominuição*" que conduz aos menores custos de operação e ao mínimo consumo específico de energia. Os processos auxiliares de classificação e transporte fazem parte deste sistema, contribuindo, com base nas propriedades específicas das substâncias liberadas, para melhorar a recepção de energia por parte da rocha, em geral, e da substância de interesse, em particular.

Nos circuitos fechados de moagem (não recomendados, em geral, por esta nova abordagem), a função "classificação" é externa (diferente da classificação interna que promove a cominuição seletiva), executada por um equipamento auxiliar (hidroclassificador, peneira, hidrociclone, etc.) e o transporte de massa dentro do moinho inclui a carga circulante gerada por esse sistema de classificação. Esta carga circulante, quando é muito elevada, muda significativamente o regime de distribuição de tempo das partículas dentro do moinho, homogeneizando erradamente a aplicação de energia, ao ponto que anula os benefícios derivados do sistema de classificação interna, que propicia maior seletividade e menor consumo energético do processo de moagem de partículas heterogêneas.

As Teorias Clássicas da Moagem

El abordaje "energético" del fenómeno, idealizado por Bond (Bond F., 1961), es el más empleado actualmente para proyectar instalaciones de molienda, pero esta interpretación macrofenomenológica, por el hecho de basarse en condiciones estandarizadas de operación (alto nivel de carga de bolas, velocidad crítica definida, carga circulante fija, etc.) no posee fundamento teórico que permita la optimización operacional del proceso. La evolución de este tipo de modelo se basa cada vez más en fórmulas empíricas, que pretenden corregir mediante numerosos "factores de corrección" las naturales diferencias entre los parámetros obtenidos en el laboratorio y el scale-up industrial. Por otro lado, los modelos del tipo "cinético", con casi 40 años de desarrollo, todavía no evolucionaron lo suficiente como para ofrecer alternativas prácticas de simulación y optimización.

A abordagem "**energética**" do fenômeno, idealizada por Bond (Bond F., 1961), é a mais empregada atualmente para projetar instalações de moagem, mas esta interpretação macrofenomenológica, pelo fato de basear-se em condições padronizadas de operação (alto nível de enchimento de bolas, velocidade crítica definida, carga circulante fixa, etc.) não possui fundamento teórico que permita a otimização operacional do processo. A evolução deste tipo de modelo baseia-se cada vez mais em fórmulas empíricas, que pretendem corrigir mediante numerosos "fatores de correção" as naturais diferenças entre os parâmetros obtidos no laboratório e o scale-up industrial. Por outro lado, os modelos do tipo "**cinético**", com quase 40 anos de desenvolvimento, na nossa visão ainda não evoluíram o suficiente para oferecer alternativas práticas de simulação e otimização.

Muitos Autores estabelecem que o primeiro requisito de um modelo é que este deve proporcionar uma boa aproximação com os dados observados na prática industrial, utilizando o conceito de que esses modelos teriam que *prever* a operação contínua industrial, diferentemente do **Modelo Operacional**, que pretende *otimizar* as operações, inclusive já na etapa de projeto.



1.2.4 Avaliação Macroscópica:

A transferência de massa devido a cominuição e suas conseqüências metalúrgicas podem ser avaliados, de maneira macroscópica, através dos resultados das análises granulométricas, químicas e de contagem de grãos sobre seções polidas ao microscópio, de amostras obtidas em ensaios de laboratório realizados com equipamentos de pequeno tamanho (contínuos ou em batelada). A “**Cinética**” do processo pode ser avaliada mediante o estudo do perfil de velocidades de transferência de fragmentos da rocha para a polpa (“Cinética de Quebra” - sistema convencional) ou através da velocidade de liberação dos grãos da substância do nosso interesse (“**Cinética de Liberação**”- como propõe o **Modelo Operacional**). A “**Função Transporte**” pode ser avaliada pela velocidade de retirada do produto, cujo tempo corresponde aproximadamente ao tempo de residência da água, nos processos a úmido, ou pela velocidade do ventilador de arraste, nos processos a seco. A “**Seletividade**” da cominuição é avaliada pelo *fator de separação* entre a substância liberada do nosso interesse e outras substâncias e a ganga, na fase rocha, e pela *Curva de Seletividade* propiciada pela classificação interna, na fase polpa. Finalmente, a forma e otimização da “**Aplicação de Energia**”, junto aos aspectos anteriores, serão os mecanismos macroscópicos utilizados neste texto para se avaliar o fenômeno de cominuição.

A avaliação macroscópica do processo de moagem, pela forma convencional conhecida até agora, poderia incluir os seguintes aspectos, todos eles tratados neste texto, mas agora de acordo com a nova abordagem proposta:

- a) **Características da Alimentação:** tipos mineralógicos de interesse; ganga; tamanhos de alimentação (F80) e do produto (P80); tamanho de liberação; peso específico das substâncias componentes; presença de lamas, etc.
- b) **Aspectos Mecânicos:** sistema de transmissão, diâmetro do moinho, velocidade de rotação, tipo de revestimentos, etc.
- c) **Variáveis de Processo:** preparação da alimentação (britagem, deslamagem, etc.); fluxograma (circuito, etapas, etc.); parâmetros de operação (nível de enchimento, tipo de corpo moedor; tempo de residência, % de sólidos, etc.).

As variáveis de processo são aquelas que mais dificuldades têm apresentado para as abordagens convencionais da moagem. Na **Tabela 1.2.3** é mostrado um diagrama que ilustra as etapas reais do fenômeno de cominuição.

Tabela 1.2.3 - Diagrama do Fenômeno Real de Moagem

COMINUIÇÃO (FENÔMENO NATURAL)	<ul style="list-style-type: none"> • Quebra (distribuição dos fragmentos) • Seleção (velocidade)
+ OPERAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> • Função Transporte • Aplicação de Energia
= MOAGEM HOMOGÊNEA	Cimento, pelotização, materiais industriais. $\Phi = f(P80)$
+ CLASSIFICAÇÃO INTERNA	Separação fases rocha e polpa <u>durante</u> o processo de moagem
= MOAGEM SELETIVA	<ul style="list-style-type: none"> • Moagem de partículas heterogêneas $\Phi_A \neq \Phi_B, (\text{mesmo } P80)$



1.3 Fase Rocha: Cominuição

*Para efectos de una mejor comprensión de este texto es importante reiterar que hemos establecido que el fenómeno de **cominución**, normalmente definido y estudiado en todos los abordajes teóricos más conocidos, aquí se refiere apenas al fenómeno natural de reducción de tamaño mediante los mecanismos de quiebra y distribución de los fragmentos extraídos de la roca, del punto de vista de un observador situado dentro de la fase roca, sin mucha preocupación con los aspectos ligados a la operación del equipo. Por otro lado, la **molienda** se refiere también a la producción efectiva de masa liberada de la sustancia de nuestro interés manipulando, con visión externa al fenómeno y mediante actuación operacional, diversas variables que crean ineficiencias que consumen energía y que, para el caso de **molienda selectiva**, perjudican el gradiente natural de transporte de masa en la fase pulpa, reduciendo la selectividad del proceso. La suma de estos enfoques, **cominución + operación + clasificación**, es llamada de “Molienda Selectiva”, como ocurre en la mayoría de los procesos industriales. La molienda es una forma de administrar el fenómeno natural de cominución. El **chancado**, con sus particularidades, es también una forma de aplicación del fenómeno de cominución.*

Para efeitos de uma melhor compreensão deste texto é importante reiterar que temos estabelecido que o fenômeno de **cominuição**, normalmente definido e estudado em todas as abordagens teóricas mais conhecidas, refere-se aqui apenas ao fenômeno natural de redução de tamanho mediante os mecanismos de quebra e distribuição dos fragmentos extraídos da rocha, do ponto de vista de um observador situado dentro da fase rocha, sem muita preocupação com os aspectos ligados à operação do equipamento. Por outro lado, a **moagem** se refere também à produção efetiva de massa liberada da substância de nosso interesse manipulando, com visão externa ao fenômeno e mediante atuação operacional, diversas variáveis que criam ineficiências que consomem energia e que, para o caso da **moagem seletiva**, prejudicam o gradiente de transporte de massa na fase polpa, reduzindo a seletividade do processo. A soma destes enfoques, **cominuição + operação + classificação**, é chamada de “Moagem Seletiva”, como ocorre na maioria dos processos industriais. A moagem é uma forma de administrar o fenômeno natural de cominuição. A **britagem**, com as suas particularidades, é também uma forma de aplicação real do fenômeno de cominuição.

1.3.1 Mecanismos Macroscópicos da Quebra e Liberação

Los fragmentos de roca requieren una determinada fuerza mínima de quiebra para distribuirse en nuevos fragmentos de menor tamaño y mayor liberación de la sustancia de interés. Cuanto mayor sea la fuerza aplicada sobre un determinado fragmento de roca, más fragmentos de menor tamaño serán producidos, hasta cierto límite a partir del cual la distribución de la quiebra para un determinado evento (balance granulométrico de los fragmentos producidos a partir de un determinado tamaño de fragmento sometido a la quiebra) permanece más o menos constante.

Os fragmentos de rocha requerem de uma determinada força mínima de quebra para se distribuir em novos fragmentos de menor tamanho e maior liberação da substância de interesse. Quanto maior seja a força aplicada sobre um determinado fragmento de rocha, mais fragmentos de menor tamanho serão produzidos, até certo limite a partir do qual a distribuição da quebra para um determinado evento (balanço granulométrico dos fragmentos produzidos a partir de um determinado tamanho de fragmento submetido à quebra) permanece mais ou menos constante. O excesso de força, por tanto, constitui uma ineficiência do sistema, que aumenta o consumo específico de energia e pode, na maioria dos casos, produzir uma indesejada quantidade de superfinos no produto cominuído.



As forças envolvidas na quebra das partículas são principalmente três (além da combinação entre elas, como acontece nas operações massivas de cominuição, como é a moagem): *Impacto*, *Atrição* e *Abrasão*. Estas forças podem vir a ser seletivas, em maior ou menor grau, dependendo da forma de aproveitamento da energia aplicada.

- **Impacto**

Na **Figura 1.3.1** é ilustrado o efeito da aplicação de energia de impacto na cominuição observada em *operações de britagem*, onde a energia cinética é entregue à rocha, a qual bate contra a placa de desgaste do britador.

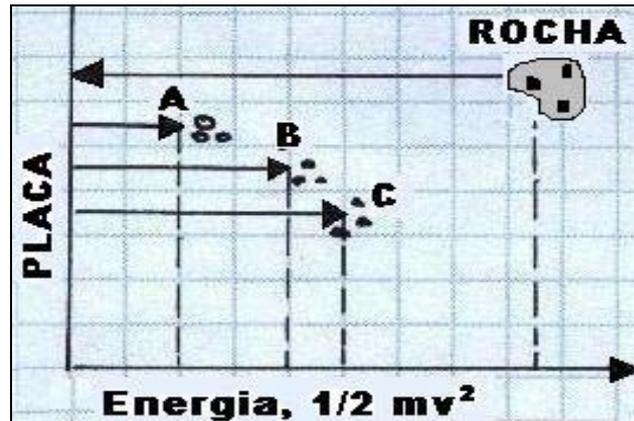


Figura 1.3.1 – Força de Impacto na Britagem

A energia cinética entregue à rocha, no momento de atingir a placa de desgaste, cria uma força de reação, em sentido contrário. As substâncias mais pesadas **recebem** mais energia de reação (possuem mais massa); as substâncias mais duras e com grãos de menor tamanho **precisam** de mais energia, como ilustrado na figura anterior.

$$E = - \overset{\text{Ação}}{\frac{1}{2} m_R v^2} = \overset{\text{Reação}}{\frac{1}{2} m_A v^2} + \frac{1}{2} m_B v^2 + \frac{1}{2} m_C v^2 + \text{Perdas} \quad (1.15)$$

A quebra de cada substância irá ocorrendo ao atingir uma certa energia mínima, como se fosse o ponto de ebulição de cada substância dentro da mistura. Para o caso da Figura 1.3.1, a substância **A** quebra mais rápido que as outras.

O *grau de liberação* possível de ser atingido por cada uma das substâncias dependerá do grau de heterogeneidade dos componentes da rocha, como ilustrado na **Figura 1.3.2 a e b**, onde mediante a *Curva de Seletividade* é exemplificado o grau de liberação (Φ) das diversas substâncias em função da energia aplicada ao equipamento (ou seja, uma estimativa “Gross” da energia entregue à fase rocha). Como observado na figura, a substância **A** poderia ser liberada de forma mais ou menos seletiva dependendo da heterogeneidade da rocha e de outros aspectos ligados ao processo. Por exemplo, a Figura 1.3.2 a) poderia representar a britagem da rocha mediante britador de cone, e a Figura 1.3.2 b) poderia representar o mesmo material britado por impacto, em britadores de martelos. Para o caso da *moagem*, a diferença de seletividade entre a operação do moinho em circuito fechado (homogeneização do processo) vs. circuito aberto (aproveitamento da classificação interna) poderia parecer muito com as figuras apresentadas.

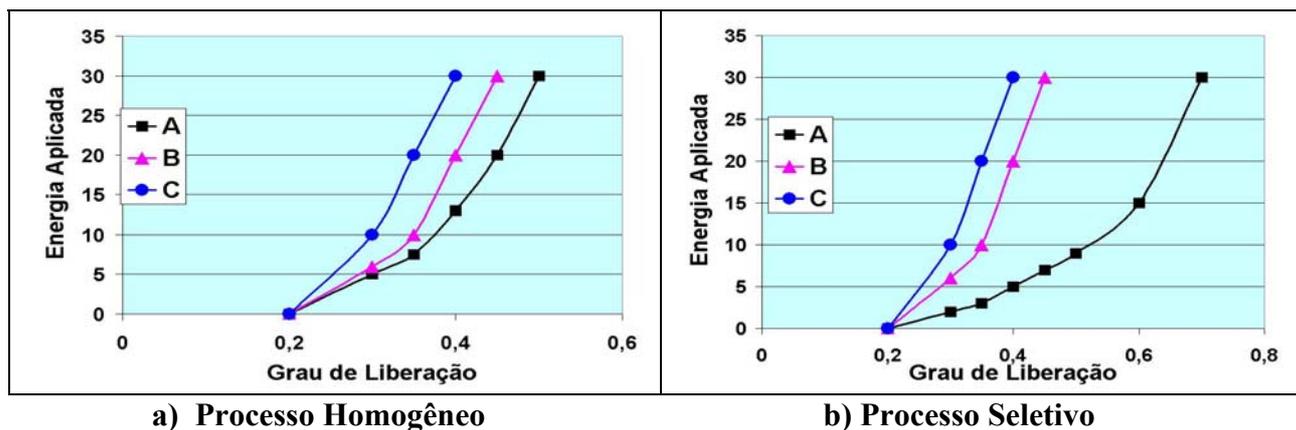


Figura 1.3.2 – Seletividade da Cominuição

A energia total consumida para materiais selecionados varia com a energia relativa de impacto. O aumento do consumo energético quando baixas energias relativas de impacto são empregadas se deve à baixa probabilidade de fratura das partículas. De fato, o comportamento da curva nessa parte depende da suscetibilidade do material à fratura por impactos repetitivos. O quartzo, por exemplo, não é muito suscetível a danos por impactos repetidos (Tavares L.M., 2003) e, portanto, o consumo energético aumenta significativamente para baixos valores de E . Por outro lado, o minério de ferro, que é particularmente suscetível a danos por impactos repetidos, apresenta somente um aumento modesto de consumo de energia para baixos valores de E . Conclui-se, portanto, que o menor consumo energético ocorre a baixas energias relativas de impacto.

Para o caso das *operações de moagem*, a energia de impacto está baseada na energia transferida ao corpo moedor, pelo levante da carga moedora, gerado pela rotação do moinho, auxiliado pelo perfil do revestimento. A energia aplicada à rocha é direta e por tanto sem espaço para exteriorizar a seletividade das substâncias (esta vez é o corpo moedor que impõe a sua força). O diâmetro do moinho, a altura da queda (que depende da fração da velocidade crítica e do perfil do revestimento) e a massa do corpo moedor são variáveis que definem diretamente a magnitude da força de impacto aplicada.

$$F = m g \quad (1.16)$$

Lembrando da nossa analogia com o processo de destilação, a pressão massiva imposta pelos corpos moedores, tanto nas frações mais moles ou nas mais duras da rocha, equivale ao processo de fervura numa panela de pressão, onde não estamos dando chance para que substâncias com menor ponto de ebulição abandonem antes a panela (fase rocha), criando uma fase vapor (polpa) onde forçamos a homogeneidade da fase. Isso mesmo acontece com os circuitos fechados de moagem.

Como o aproveitamento da heterogeneidade das rochas é fundamental para a maior seletividade e menores consumos de energia na liberação, é altamente recomendável que o mecanismo de impacto seja integralmente utilizado nas operações de britagem, em britadores de martelos, nas operações terciárias, gerando produtos do menor tamanho quanto possível ($-\frac{1}{4}$ ou $-\frac{3}{8}$ de polegada). Após esta operação, deve-se avaliar a possibilidade de pré-concentrar o minério, eliminando frações grosseiras, onde se acumulam as frações de magnetita, por exemplo, e as lamas e superfinos, que trazem muitas impureza e contaminantes dentro dos processos posteriores de concentração.



- **Atrição**

A força de atrição corresponde à aplicação de pressão sobre a rocha, entre as placas de desgaste e o manto, para as *operações de britagem*, ou de forma massiva, em todas as direções (como se se tratasse da pressão hidrodinâmica à que se encontra submetida uma partícula submersa em águas profundas), nas *operações de moagem*. O mecanismo de atrição é pouco seletivo e o equipamento impõe a sua força sobre a rocha, sem levar muito em consideração a sua heterogeneidade, pelo menos não da forma tão aguçada como observado na britagem de impacto. Na **Figura 1.3.3** é ilustrado um provável esquema de aplicação desta força em britadores convencionais. O ponto de início da aplicação da força corresponde a E_0 , onde o volume ocupado pelas rochas é acomodado entre as duas placas, numa distância máxima equivalente ao “*open setting*” do britador.

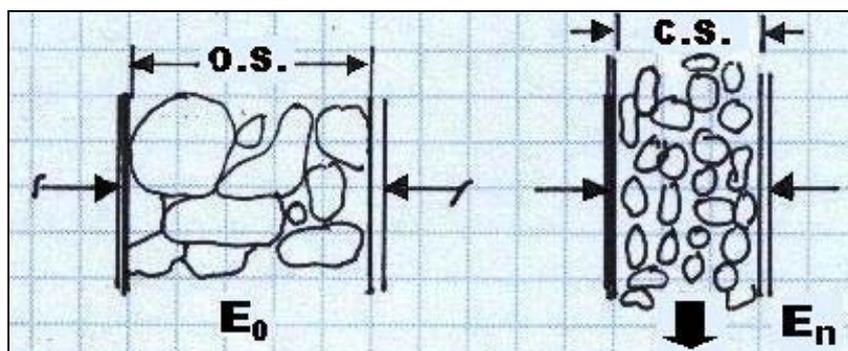


Figura 1.3.3 – Força de Atrição na Britagem

Após o evento de quebra, a rocha sofre fragmentação e, pela perda gradativa de distancia entre as placas, os fragmentos são deslocados perpendicularmente ao eixo da força aplicada. Os eventos se sucedem até atingir E_N , no ponto de menor abertura entre as placas, o “*closed setting*”, que corresponde à descarga da câmara do britador. A intensidade da força é aproximadamente a mesma, mas a distancia entre as placas vá diminuindo, acompanhando o menor tamanho dos fragmentos produzidos. Os britadores de cone normalmente aplicam esta força de forma mais gradativa, onde vários eventos ($N = 5$ a 10 , na prática industrial), com força mais ou menos controlada, produzem fragmentos mais arredondados e homogêneos. Os britadores de mandíbulas, pelo contrário, apresentam forças de atrição mais acentuadas e com menor quantidade de eventos, permitindo o lajeamento do produto, o que algumas vezes é indesejado nas etapas que se seguem. A britagem por atrição é fundamentalmente um processo homogêneo, onde os resultados são acompanhados pela redução de tamanho médio das partículas e não necessariamente pela liberação de determinadas substâncias; por isso é muito utilizado nas operações de britagem primária e secundária e, nas operações terciárias, é recomendável para rochas mais ou menos homogêneas e instalações de alta capacidade de tratamento.

Como base para a melhor compreensão dos mecanismos físicos envolvidos na cominuição natural (do ponto de vista da partícula), alguns Autores têm examinado a ocorrência de deformação e fratura de partículas esféricas individuais, submetidas à compressão entre dois pratos rígidos, pelo método de elementos finitos FEM – Finite Element Method (**Kienzler R. e Schmitt W.**, 1990). É possível observar que materiais diferentes apresentam uma diferente distribuição da tensão de quebra, o que permitiria prever algumas tendências, a partir do laboratório, em auxílio dos projetos de cominuição.



O conhecimento físico da fratura requer do conhecimento da distribuição da tensão na partícula, sua redistribuição dentro da massa e sua propagação por todas as direções, assim como a sua resistência inicial frente ao esforço da quebra. A complexidade desta abordagem, que não permite soluções analíticas, requer de técnicas numéricas especiais, como o *método de elementos finitos* – FEM. Este método consiste numa aproximação numérica que considera a subdivisão teórica da partícula num número relativamente pequeno (finito) de elementos. Estes elementos são conectados com os seus vizinhos mediante pontos de contato (nodos) situados no limite entre eles. Deste modo construi-se um “caminho” de propagação para a tensão de quebra até o interior da partícula. Para aplicações práticas do FEM diversos programas comerciais de computação são comercializados.

- **Abrasão**

Trata-se da força de cisalhamento por esfregação da rocha: entre os próprios fragmentos; entre a rocha e os corpos moedores e entre a rocha e o revestimento. Este tipo de mecanismo de cominuição é observado nas operações de moagem, principalmente nas etapas de moagem secundária e de remoagem. A tensão de cisalhamento parece muito com o comportamento reológico de um fluxo não newtoniano, particularmente aquele fluxo chamado de plástico de Bingham (**Bird e outros**, 1960).

Consideremos um fluido (líquido ou gás) contido entre duas grandes placas planas e paralelas, de área A , separadas entre si por uma distância muito pequena Y . Num determinado instante a placa inferior começa a se movimentar na direção do eixo x , com uma velocidade constante V . Ao atingir estado estacionário, pela segunda lei de Newton demonstra-se que a força F , constante, que deve ser aplicada na placa móvel para conservar o seu movimento, por unidade de área, é proporcional à diminuição desta velocidade com a distância Y . A constante de proporcionalidade é a viscosidade (μ), como mostrado na equação 1.17:

$$\tau_{yx} = F/A = -\mu d_{vx}/d_y \quad (1.17)$$

Ou seja, a força por unidade de área é proporcional ao gradiente negativo da velocidade local (vai decrescendo até encostar-se à placa fixa, onde o valor é zero).

A quantidade de movimento x se transmite através do fluido na direção y , a jusante do fluxo viscoso. Nos líquidos, onde as moléculas percorrem distâncias muito curtas entre as colisões, o mecanismo principal de transporte de quantidade de movimento consiste na colisão efetiva entre as moléculas. Para o caso de soluções sólidas, como as rochas, a energia inicial, no tempo $t = 0$, precisa atingir um determinado valor antes de começar a movimentação das placas submetidas a esforço. Isto é:

$$\tau_{yx} = -\mu d_{vx}/d_y + \tau_0 \quad (1.18)$$

Este comportamento é chamado como Modelo de Bingham, ou plástico de Bingham, e poderia representar, analogicamente, o mecanismo da abrasão na fase rocha, onde τ_0 é equivalente à energia necessária para produzir a quebra por cisalhamento.

As conclusões macroscópicas que podem surgir desta abordagem são descritas a seguir, para as operações de britagem e de moagem.



1.3.2 Fenômeno Real de Cominuição

1.3.2.1 Britagem

O gradiente que promove a transferência macromolecular de massa da solução rochosa para a polpa é a intensidade e a forma da força aplicada sobre a fase rocha, que nas operações de britagem são fundamentalmente de atrição e impacto, como resumido na **Tabela 1.3.1**.

Tabela 1.3.1 – Esquema de Aplicação de Energia na Britagem

FORÇA	BRITADORES	COMENTÁRIOS
ATRIÇÃO Pressão localizada $(P = F/A)$ placa → rocha ← manto	(Mandíbulas, cone, rolos) A pressão é exercida pelas placas de desgaste dos equipamentos contra o manto fixo (ou vice-versa).	Cominuição homogênea , onde não é relevante a classificação interna, mas apenas a redução de tamanho, em geral. A distribuição dos fragmentos é relativamente homogênea, ou seja, a composição dos fragmentos é muito próxima à composição da rocha cominuída.
IMPACTO Força por energia cinética $F = \frac{1}{2} m v^2$ rocha → placa	(Britadores de Martelos) A energia cinética é transferida à rocha, que bate contra a placa de desgaste do equipamento.	Cominuição seletiva , onde a rocha “administra” a quebra. As substâncias mais moles são rapidamente desprendidas das partículas mais duras. A distribuição da quebra é tão heterogênea quanto sua rocha base.

As forças utilizadas na britagem são diretas e localizadas, permitindo um eficiente uso da energia aplicada. O consumo energético total nas operações de britagem é normalmente inferior a 0,5 kWh/t, com pouquíssima dependência de propriedades intrínsecas do minério, como a dureza, tamanho dos grãos, tamanho da alimentação (**F80**) - desde que consiga entrar na câmara de britagem (*open setting*) - etc. O fator que mais influencia a capacidade e a potencia dos equipamentos de britagem é o tamanho médio desejado (**P80**), controlado pelo *closed-setting*. Tem sido comprovado que, nestas operações, o custo financeiro do investimento é maior que o custo direto de operação (**Yovanovic**, 1989), de modo que a otimização destas operações deve ser enfrentada pelo lado do investimento, procurando fluxogramas simples e enxutos, como será visto no item 7.2.

A *cominuição seletiva* que proporciona a britagem por impacto permite efetuar a pré-concentração de minérios altamente heterogêneos, como acontece comumente nas jazidas a céu aberto de rochas degradadas (secundárias), retirando as frações granulométricas com baixo teor de substância de interesse, normalmente as frações grossas (magnetita) e as lamas e superfinos (argilas, micas, alumina, sílica, etc.), que se constituem em impurezas indesejáveis nos processos de concentração que se seguem. O sistema de britagem chamado de “*water flush*”, introduzido pela Nordberg na década de 80 para os britadores de cone do tipo short-head, é uma forma de tornar um pouco mais seletiva, do ponto de vista granulométrico (tamanho), a cominuição nas operações de britagem, onde o fluxo de água arrasta os finos produzidos, liberando a câmara de britagem para os fragmentos de maior tamanho e evitando o amortecimento que os finos criam ao tomar conta dos interstícios entre estes fragmentos.

1.3.2.2 Moagem

Nas operações de moagem as forças atuantes são, resumidamente: a *atrição*, o *impacto* e a *abrasão*, todas elas aplicadas de forma massiva, misturada, com pouco controle e com baixíssima eficiência pelos corpos moedores (todos contra todos) com a ajuda eventual do próprio revestimento do moinho, e sem localização definida, atuando sobre toda a superfície das partículas, permanentemente, como resumido na **Tabela 1.3.2**.



Tabela 1.3.2 – Esquema de Aplicação de Energia na Moagem

FORÇA	COMENTÁRIOS
ATRIÇÃO Presão na superfície da rocha	Presão massiva dos corpos moedores, relativamente constante, ao redor dos fragmentos de rocha (como se fosse pressão hidrostática).
IMPACTO Força de gravidade $F = m g$ Corpo moedor → rocha	O moinho entrega energia à bola, levantando-a pelo efeito da velocidade periférica do manto. O diâmetro do moinho, a altura da queda (que depende da fração da velocidade crítica) e a massa do corpo moedor são variáveis que definem diretamente a magnitude da força de impacto aplicada.
ABRASÃO Força de cisalhamento por esfregação da rocha	<ul style="list-style-type: none"> • Entre os próprios fragmentos • Entre a rocha e os corpos moedores • Entre a rocha e o revestimento

*En general, la molienda a húmedo en molinos cilíndricos es esencialmente **selectiva** cuando la roca es relativamente heterogénea, como acontece con la gran mayoría de los minerales. Las partículas liberadas tienden a clasificarse y, dependiendo de la calidad de la operación y del circuito de molienda, estas peculiaridades pueden ser aprovechadas, en mayor o en menor grado, en beneficio de la selectividad de la conminución, que conduce a mejores resultados metalúrgicos en las operaciones posteriores de concentración y a menores consumos de energía específica en la molienda. Apenas en las operaciones de molienda primaria, en la quiebra inicial de partículas de top-size, se puede esperar algún beneficio en la aplicación de la fuerza de impacto en la conminución. Es muy recomendable en rocas heterogéneas agotar el efecto del impacto en las operaciones de chancado terciario, con molinos de martillos. De este modo, el diámetro del molino y el tamaño de los cuerpos moedores pueden ser dimensionados sin exagerar, utilizando con más intensidad las fuerzas de atrición y de abrasión. Cuando el molino gira, los cuerpos moedores son elevados por el lado ascendente del molino hasta obtener una situación de equilibrio dinámico donde los cuerpos moedores caen en cascada (1 – pequeñas caídas sucesivas) y en catarata (2 – caída libre) sobre la superficie libre de los otros cuerpos, alrededor de una zona muerta (3) donde ocurre poco movimiento, hasta el “pié” de la carga del molino, como se ilustra en la **Figura 1.3.4**.*

Em geral, a moagem a úmido em moinhos tubulares é essencialmente **seletiva** quando a rocha é relativamente heterogênea, como acontece com a grande maioria dos minérios. As partículas liberadas tendem a se classificar e, dependendo da qualidade da operação e do circuito de moagem, estas peculiaridades podem ser aproveitadas, em maior ou em menor grau, em benefício da seletividade da cominuição, que conduz a melhores resultados metalúrgicos nas operações posteriores de concentração e a menores consumos de energia específica na moagem. Apenas nas operações de moagem primária, na quebra inicial de partículas de *top-size*, pode-se esperar algum benefício na aplicação da força de impacto na cominuição. É muito recomendável em rochas heterogêneas esgotar o efeito do impacto nas operações de britagem terciária, com moinhos de martelos. Deste modo, o diâmetro do moinho e o tamanho dos corpos moedores podem ser dimensionados sem exageros, utilizando com mais intensidade as forças de abrasão. Quando o moinho gira, os corpos moedores são elevados pelo lado ascendente do moinho até obter uma situação de equilíbrio dinâmico onde os corpos moedores caem em cascada (1 – pequenas quedas sucessivas) e em catarata (2 – queda livre) sobre a superfície livre dos outros corpos, ao redor de uma zona morta (3) onde ocorre pouco movimento, até o “pé” da carga do moinho, como é ilustrado na **Figura 1.3.4**. Na ótica do **Modelo Operacional**, a energia aplicada ao processo em relação aos objetivos desejados para o produto (Φ ou P80), segue três etapas típicas, de acordo com o tamanho e/ou etapa de cominuição: a) desagregação da rocha, rompendo as ligações básicas da ganga sobre as substâncias; b) propagação da tensão de quebra pelos bordes entre grãos; e c) quebra dos próprios grãos.

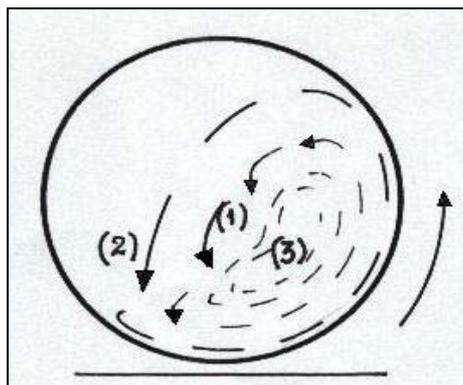


Figura 1.3.4 – Movimento da Carga Moedora na Moagem

Resumindo, podem-se distinguir três tipos de movimento dos meios de moagem num moinho rotatório: a) rotação ao redor do seu próprio eixo, b) queda em *cascata*, onde os corpos moedores descem rodando pela superfície dos outros corpos e c) queda em *catarata*, que corresponde à queda livre dos meios de moagem sobre o “pé” da carga. A magnitude da elevação que sofrem os corpos moedores depende da velocidade de rotação do moinho e do seu tipo de revestimento. Para velocidades relativamente baixas e com revestimentos lisos, os corpos moedores tendem a rodar até o pé do moinho e os mecanismos de cominuição mais utilizados são os de atrição e de abrasão, o que é desejável na moagem fina (chamado de “non-cataracting mill”- Myers, 1957).

Para a queda em *catarata* se espera que a aplicação de energia seja mais intensa, com maior produção de superfinos e com incremento no desgaste dos revestimentos. A partir de uma determinada velocidade, que depende do nível de enchimento e do perfil dos revestimentos, os corpos moedores são projetados sobre a carga descrevendo uma série de parábolas antes de aterrar no pé da carga; esta queda em *cascata* pode produzir um produto um pouco mais grosso da ganga e com menor desgaste dos revestimentos. A velocidade crítica do moinho é a velocidade mínima na qual a camada exterior de corpos moedores fica aderida à superfície interior do cilindro, devido à força centrífuga gerada pela rotação do moinho, gerando um equilíbrio entre a força centrífuga e o peso dos corpos moedores. A faixa de trabalho dos moinhos industriais fica em torno a 60-80% desta velocidade.

As operações de moagem são altamente dependentes das características da rocha, como a dureza, tamanho do grão, F80 e P80 (principalmente este último). A heterogeneidade da rocha, com base na variedade de espécies presentes, o tamanho dos grãos e a diferente gravidade específica dos componentes, pode ser aproveitada mediante um adequado circuito e sua correta operação. A moagem é comumente a operação de maior custo de investimento e de operação dentro das usinas de beneficiamento, de modo que devem ser utilizados todos os esforços em dimensionar de forma ótima os circuitos e operá-los corretamente. Como antes comentado, um procedimento de simulação foi desenvolvido que permite estimar o consumo energético na cominuição de partículas individuais a partir das características de quebra e fragmentação de partículas, determinadas na Célula de Carga de Impacto (Tavares, L.M., 2003). Resultados de simulação mostram que a energia total consumida depende significativamente da razão entre a energia usada em cada impacto e a energia média de fratura das partículas em cada classe de tamanhos. Comparações entre a energia mínima de cominuição e a energia consumida na moagem indicam que a eficiência energética situa-se tipicamente entre 8 e 23% (Detalhes no **Capítulo 3**).



1.3.3 A Propriedade Macrofenomenológica da Quebra

Britagem

Las operaciones de chancado son generalmente observadas apenas en estado estacionario, pues el tiempo de duración del proceso es muy corto y la cantidad de eventos es bastante reducida; por otro lado, por la facilidad de trabajar con poca cantidad de muestra y la inmediata obtención del estado estacionario, es posible estudiar el proceso directamente en la escala continua, no siendo necesario un esfuerzo tan grande en el modelado de estas operaciones. En la práctica industrial, en chancadores primarios, por ejemplo, es posible observar que la roca no recibe más que 3 o 5 eventos de atrición por parte de la coraza del chancador hasta salir por el closed-setting; en el caso de los chancadores secundarios o terciarios es esperado un número de eventos un poco mayor (5 a 10).

As operações de britagem são geralmente observadas apenas em estado estacionário, pois o tempo de duração do processo é muito curto e a quantidade de eventos é bastante reduzida; por outro lado, pela facilidade de trabalhar com pouca quantidade de amostra e a imediata obtenção do estado estacionário, é possível estudar o processo diretamente na escala contínua, não sendo necessário um esforço tão grande na modelagem destas operações. Na prática industrial, em britadores primários, por exemplo, é possível observar que a rocha não recebe mais do que 3 ou 5 eventos de atrição por parte da couraça do britador até sair pelo *closed-setting*; no caso dos britadores secundários ou terciários é esperado um número de eventos um pouco maior (5 a 10).

Moagem

El Índice de Trabajo, o Work Index, es el parámetro de conminución utilizado por los modelos llamados de energéticos y expresa la resistencia de un material a ser triturado y molido. Numéricamente, son los kilowatts-hora por tonelada corta requeridos para reducir un material desde un tamaño teóricamente infinito a un producto de 80% menos 100 μm.

O Índice de Trabalho, o Work Index, é o parâmetro de cominuição utilizado pelos modelos chamados de energéticos e expressa a resistência de um material a ser britado e moído. Numericamente, são os kilowatts-hora por tonelada curta requeridos para reduzir um material desde um tamanho teoricamente infinito a um produto de 80% menos 100 μm. A terceira Lei da teoria de Bond (**Bond**, F.C., 1961) estabelece uma relação entre a energia aplicada ao sistema e a recebida pelo material, dentro de uma determinada faixa granulométrica. Nesta faixa, Bond extrai uma constante do minério denominada “**work index**” (W_i , kWh/st), valor este que poderia ser extrapolado à escala industrial. Este índice é uma estimativa do consumo específico de energia a ser aplicado ao moinho para reduzir a granulometria do minério dentro de uma faixa definida. Detalhes desta abordagem podem ser observados no **Capítulo 3**.

$$W = \frac{10 W_i}{\sqrt{P80}} - \frac{10 W_i}{\sqrt{F80}}, \text{ kWh/st} \quad (1.19)$$

Pela expressão anterior, uma determinada rocha, de dureza W_i , consome W (kWh/st) para ser reduzida de tamanho **F80** para **P80**. Esta propriedade fundamental dos **modelos energéticos**, o “*work index*”, é obtida em moinhos de laboratório operando em batelada, mas a experiência encontra-se padronizada com a operação paralela de um moinho industrial de 8,0 pés de diâmetro interno, que Bond utilizou para calibrar o seu modelo.



Porém, pode-se pensar que para projetar um moinho idêntico ao de Bond (8,0 pés de diâmetro interno, 8,0 pés de comprimento nominal, 70% de velocidade crítica, 37% de enchimento de bolas, 77% de sólidos, etc.) a experiência de laboratório conduziria, com muita aproximação, ao “prognóstico” do comportamento industrial do novo minério. As dificuldades do modelo de Bond, para dimensionar equipamentos de diferentes tamanhos ou condições operacionais, foram superadas com relativo sucesso por **Rowland C.** (1980). Este autor criou, com base em experiências industriais, uma série de fatores de correção, chamados fatores de “eficiência” ou de “ineficiência”, conforme o caso. Tais fatores, quando aplicados convenientemente, corrigem a projeto industrial do “work index” para diferentes tamanhos de moinho e condições operacionais. Estudos mais recentes (**Deister R.J.**, 1987, e **Magdalinovic N.M.**, 1989), apresentam interessantes sugestões para melhorar a confiabilidade de cálculo e “scale-up” dos parâmetros energéticos, obtidos na experiência de Bond no laboratório.

Austin e outros (1982), apontam quatro grandes desvantagens ou erros do método de Bond para cálculo de moinhos, comentários compartilhados pelo **Modelo Operacional**:

- 1) O consumo específico de energia não coincide com o valor previsto quando se modificam as condições de referência: carga circulante, nível de enchimento de bolas, condições reológicas, etc.;
- 2) O modelo de Bond explicitamente assume que o consumo específico de energia não é função do nível de enchimento de bolas (o que é comprovadamente falso);
- 3) O método de Bond utiliza uma referência granulométrica restrita a F80 e P80, sem considerar a distribuição em toda sua amplitude. O Modelo Operacional não apresenta restrições, desde que se leve em conta a relação **P80-Φ** para operações seletivas;
- 4) O método de Bond não distingue claramente as causas da ineficiência de operação do moinho, em determinadas condições.

Como veremos no **Capítulo 4**, alguns Autores descrevem o fenômeno de cominuição natural mediante o acompanhamento do balanço populacional, baseado apenas no tamanho das partículas, ou seja, como se o processo fosse apenas homogêneo, mediante dois mecanismos que são muito utilizados nas abordagens atuais, do **tipo cinético**: a *função quebra* e a *função seleção*. O modelo populacional desenvolvido por **Reid K.J** (1965), que estende o sistema cinético obtido no estado estacionário para moinhos contínuos, é mostrado na expressão 1.20 a seguir. Sua aplicação e a evolução desta abordagem desenvolvida por outros Autores será discutida no **Capítulo 4**.

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = -S_i m_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} S_j m_j(t) \quad (1.20)$$

B = Matriz Quebra,

Onde o termo b_{ij} indica a fração de massa originalmente na faixa “j”, reduzida à faixa “i” após o evento de quebra. Observa-se que o coeficiente b_{ij} é análogo a um coeficiente estequiométrico de uma reação química.

S = Função Seleção,

Onde S_i representa a frequência de fragmentação das partículas localizadas na faixa granulométrica “i”. S_i é função do tempo, e tem o mesmo significado que uma constante cinética de uma reação química de primeira ordem (requisito de “linearidade” exigido pelos modelos cinéticos). Obviamente, i é maior ou igual que j , e j é maior ou igual que 1.



No fundo, estes dois componentes misturam o conceito cinético da engenharia química com o processo físico da cominuição (**Franks R.G.E.**, 1972; **Lynch A.J.**, 1977; **Austin L.G. e outros**, 1982-1984 e **Herbst J.A.**, 1987). Restrições dos modelos cinéticos, tais como: linearidade das funções analíticas que descrevem o comportamento cinético (muito difícil de acontecer na prática); transferência direta das constantes cinéticas do processo descontínuo a condições de estado estacionário e a extrapolação direta e sem condições limites da função específica de quebra em relação ao diâmetro do moinho, constituem alguns dos problemas desta abordagem macrofenomenológica (**Brossaud A.**, 1988).

Lynch A.J. (1977), utilizando os conceitos cinéticos dos modelos conhecidos, cria uma alternativa de tipo matricial, onde a cominuição é uma sucessão de eventos de quebra, na qual a alimentação de cada evento é o produto do evento precedente. Segundo o Autor, isto é válido para cada tamanho ou faixa granulométrica e sua correspondente distribuição de quebra. A maneira pela qual as partículas são fragmentadas, gerando um conjunto de distribuições granulométricas, é condensada numa matriz “**X**”, a qual deve ser definida experimentalmente no laboratório. A distribuição granulométrica resultante de um evento de quebra é obtida a partir do produto vetorial:

$$\mathbf{p} = \mathbf{X} \times \mathbf{f} \quad (1.21)$$

Onde **f** representa a distribuição granulométrica da alimentação, distribuição esta variável após cada evento. Por outro lado, a função quebra do modelo de Lynch é um conceito probabilístico que varia em função do tamanho da partícula. A abordagem de Lynch apresenta maiores limitações que as dos outros modelos de tipo cinético, devido à pouca consideração dos aspectos de transporte dentro do moinho.

O **Modelo Operacional** utilizará a seguinte expressão para descrever a transferência de massa pelo evento de quebra, nas operações de **moagem**, para uma rocha constituída por ganga e uma substância de interesse (derivada da expressão 1.5):

$$\mathbf{R}\Phi_0 \times \mathbf{IC} \rightarrow \mathbf{G} + \mathbf{M}\Phi + \mathbf{F} \quad (1.22)$$

Onde **IC** é o *Índice de Cominuição*, introduzido pelo Modelo Operacional (**Yovanovic e Moura**, 1991, 1993) e que será intensamente utilizado ao longo do texto. Uma determinada quantidade de contatos massivos entre corpos moedores e minério, por unidade de força, permite que o material seja cominuído até um tamanho definido. Poucos contatos, mas de grande força, podem eventualmente equivaler a muitos contatos de menor intensidade (diferença de diâmetro do moinho, por exemplo).

Isto é válido dentro de certos limites impostos ao diâmetro do moinho e ao tamanho do corpo moedor (**Austin L.G.**, 1984):

- i) diâmetro mínimo, que corresponde à altura mínima necessária para produzir a quebra por impacto do “*top-size*” do minério;
- ii) diâmetro máximo, a partir do qual aumentos na altura de queda, e por tanto da força de impacto, não produzem maior cominuição das partículas (quebra constante).

Austin, L.G. e outros (1982) observam que o efeito cascata (ao nosso entender o melhor efeito de movimentação da carga moedora dentro do moinho) que acontece em moinhos de grande diâmetro, proporciona uma *série de pequenos impactos* da mesma magnitude que a proporcionada por moinhos de menor diâmetro. Não é o caso do efeito catarata (que promove a quebra por impacto), o qual é maior nos moinhos de maior diâmetro.



É importante lembrar que, na perspectiva desta nova abordagem, o conceito de quebra refere-se realmente à liberação de grãos de dentro de uma solução rochosa, de modo que os fragmentos produzidos são, normalmente, diferentes do fragmento original e diferentes dos outros fragmentos gerados pela redução de tamanho do fragmento base, de modo que as abordagens microscópicas que estudam a propagação das forças de tensão serviriam apenas para partículas de substâncias homogêneas. No conceito do **Modelo Operacional**, o fenômeno de cominuição é, na realidade, a resultante do produto dos vetores quebra e seleção que, necessariamente, *não varia de forma linear* com o tempo, principalmente nas frações granulométricas mais grossas.

O modelo propõe que, dependendo do tempo de residência das partículas e das condições operacionais, definindo-se a quantidade mais provável de contatos massivos entre os corpos moedores e o material e a intensidade deste contato, o **Índice de Cominuição** pode ser expresso por:

$$IC = (BL / TM) \times TZ \times DI \times RM \times FG, (\text{Potência} - \text{hora})/t \quad (1.23)$$

Onde,

TZ = Tempo de residência dos fragmentos de rocha dentro da *zona de moagem*, min;

TM = Taxa de alimentação, em toneladas métricas por hora, base seca;

BL = Peso da carga de bolas dentro do moinho, toneladas métricas;

RM = Velocidade de rotação do moinho, rpm;

DI = Diâmetro interno do moinho, pés;

FG = Fator de golpe, por rpm. Quantidade estimada de golpes (ações sobre o material) que um corpo moedor qualquer poderia proporcionar por cada rotação do moinho, a qual é função do nível de enchimento.

Un mineral duro requiere mayor Índice de Conminución que otro más quebradizo para ser reducido de un tamaño F80 a P80, alcanzando una deseada liberación, condición que puede ser estudiada en laboratorio. Las condiciones operacionales del equipo, elemento clave e innovador del modelo aquí propuesto, definen IC en función del tiempo, llevando en cuenta los fenómenos auxiliares de transporte y clasificación (interna y externa), como mostrado en los capítulos siguientes. Un evento macroscópico de quiebra, en la visión del modelo, equivale a la energía aplicada en una revolución del molino; o sea, el efecto masivo del contacto roca/cuerpos moedores e no eventos individuales, por cada fragmento e para cada franja granulométrica.

Um minério duro requer maior Índice de Cominuição que outro mais friável para ser reduzido de um tamanho F80 a P80, atingindo uma desejada liberação, condição que pode ser estudada em laboratório. As condições operacionais do equipamento, elemento chave e inovador do modelo ora proposto, definem **IC** também em função do tempo, levando em conta os fenômenos auxiliares de transporte e classificação (interna e externa), como mostrado nos capítulos seguintes. Um **evento macroscópico de quebra**, na visão do modelo, equivale à energia aplicada em uma unidade do Índice; ou seja, o efeito massivo do contato rocha/corpos moedores e não os eventos individuais por cada fragmento e para cada faixa granulométrica. **Tavares e Kreischer** (2004) comentam que, principalmente nas frações mais grossas, uma proporção significativa dos eventos ocorre com magnitude insuficiente para causar ruptura completa da partícula, e imaginam que, em parte devido a esta situação, as taxas de quebra (usadas nos modelos cinéticos) se tornam não-lineares. A expressão massiva do evento de quebra proposta nesta nova abordagem não leva em consideração situações pontuais como a mencionada, pois nas operações industriais o tempo de moagem é mais do que suficiente para superar esses desvios.



El abordaje mecánico de entrega de energía al equipo (Capítulo 3), está representado en la expresión 1.19, a través de las variables inherentes al equipo y la carga a ser movida, de modo que el modelo puede definir la condición óptima mecánico-operacional que permite suministrar al mineral el Índice de Cominuição necesario al mínimo consumo de energía. Por otro lado, el término TZ lleva en consideración el mecanismo de clasificación interna que favorece la molienda selectiva, a través de la sedimentación de las partículas más pesadas. En este texto introduciremos también el Índice Base de Cominuição (IB), que el material precisa para pasar de la condición F80 a P80, y que será la propiedad macrofenomenológica posible de obtener a partir de diversas maneras: en el laboratorio, mediante procedimiento experimental propuesto por el Modelo Operacional (detalles en ítem 5.4); en testes en planta piloto; o en experiencias comparativas con molinos industriales.

Salvo indicación contraria, todo el desarrollo teórico sobre cominuição y molienda utilizado en este libro corresponde a la visión de transferencia macromolecular de masa introducida por el Modelo Operacional, y la determinación de sus mecanismos macroscópicos será preferentemente observada para sistemas continuos (estado estacionario).

A abordagem mecânica da entrega de energia ao equipamento (Capítulo 3), está representada na expressão 1.23, através das variáveis inerentes ao equipamento e a carga a ser movimentada, de modo que o modelo pode definir a ótima condição mecânico-operacional que permite fornecer ao minério o Índice de Cominuição necessário ao mínimo consumo de energia. Por outro lado, o termo TZ leva em consideração o mecanismo de classificação interna que favorece a moagem seletiva, através da sedimentação das partículas mais pesadas. Neste texto estaremos introduzindo também o Índice Base de Cominuição (IB), que o material precisa para passar da condição F80 a P80, e que será a propriedade macrofenomenológica possível de obter a partir de diversas maneiras: no laboratório, mediante procedimento experimental proposto pelo Modelo Operacional (detalhes no item 5.4); em testes em planta piloto; ou em experiências comparativas com moinhos industriais.

Salvo indicação em contrário, todo o desenvolvimento teórico sobre cominuição e moagem utilizado neste livro corresponde à visão de transferência macromolecular de massa introduzida pelo Modelo Operacional, e a determinação dos seus mecanismos macroscópicos será preferentemente observada para sistemas contínuos (estado estacionário).

Na falta de testes específicos, mediante o conhecimento do Wi (Work Index) ou do Wio (Work Index Operacional), obtidos pelos procedimentos experimentais convencionais, efetuados pelo teste padrão de Bond, também, é possível deduzir o Índice Base de Cominuição (IB) que teria acontecido no moinho de referência de Bond (8 pés de diâmetro interno, 8 pés de comprimento nominal, etc.)

MODELOS ENERGÉTICOS

$$W = \frac{10 W_i}{\sqrt{P80}} - \frac{10 W_i}{\sqrt{F80}}, \text{ kWh/st}$$

MODELOS CINÉTICOS

S_i = função seleção
 b_{ij} , função quebra

MODELO OPERACIONAL

$$IC = (BL/TM) TZ DI RM FG, (\text{Potência} - \text{hora})/t$$

A PROPRIEDADE MACROFENOMENOLÓGICA



1.4 Fase Polpa: Classificação Interna

*La fase llamada de **polpa** es obviamente una referencia analógica del flujo másico de producto, donde ni siempre los procesos acontecen por la vía húmeda. A rigor, desde el punto de vista del proceso de destilación, que es la analogía de transferencia de masa utilizada, estaríamos hablando de la fase vapor. De este ángulo, hemos definido que las operaciones de conminución homogénea acontecen por causa de la homogeneidad de la roca o, como acontece en muchos casos, porque la fase polpa es extraída sin explotar la heterogeneidad de las rocas conminuidas, sea utilizando equipos y circuitos que tienden a la homogeneización de los fragmentos de roca y las partículas con algún grado significativo de liberación, o por una inadecuada operación en las plantas de beneficio.*

A fase chamada de **polpa** é obviamente uma referência analógica do fluxo mássico de produto, onde nem sempre os processos acontecem pela via úmida. A rigor, do ponto de vista do processo de destilação, que é a analogia de transferência de massa utilizada, estaríamos falando da fase *vapor*. Desse ângulo, temos definido que as operações de cominuição homogênea acontecem por causa da homogeneidade da própria rocha ou, como acontece em muitos casos, porque a fase polpa é extraída sem explorar a heterogeneidade das rochas cominuidas, seja utilizando equipamentos e circuitos que tendem à homogeneização dos fragmentos de rocha e as partículas com algum grau significativo de liberação, ou por uma inadequada operação nas usinas de beneficiamento (circuitos fechados, alto enchimento, etc.).

Nas *operações de britagem*, os britadores de impacto fornecem uma alta seletividade na cominuição, devido á administração individual da energia recebida por parte das diferentes substâncias presentes, como descrito na equação 1.15 do item 1.3.1. Como o estudo destas operações é feito sempre em estado estacionário, o conhecimento científico destes mecanismos não é fundamental para o projeto de instalações e otimização de circuitos. Os próximos itens serão dedicados a discutir com maior profundidade as *operações de moagem*.

1.4.1 Mecanismos da Classificação Interna

Corresponde à separação interna entre os fragmentos de rocha e as partículas liberadas (ou com algum grau significativo de liberação), que acontece **durante o processo de cominuição**, entre os eventos de quebra. A fim de definir realisticamente a eficiência da moagem, é necessário estabelecer um processo ideal de cominuição. Reconhecendo que a quebra de partículas individuais representa o modo mais eficiente de cominuir materiais, visto que perdas devido ao atrito e a eventos mal sucedidos são minimizadas ou totalmente evitadas, uma representação que simula um processo ideal que consiste múltiplos estágios de quebra de partículas individuais seguida de classificação granulométrica, é ilustrada na **Figura 1.4.1**, onde a seletividade do processo e o consumo energético são ótimos. Consideremos um processo de cominuição que consiste de N estágios; em cada um desses estágios, partículas compreendidas num intervalo estreito de tamanhos são submetidas, uma a uma, a sucessivos impactos seguidos de classificação numa peneira ideal. Quando nenhum material resta nessa fração, prossegue-se ao estágio seguinte e aí por diante, até que a granulometria do produto seja atingida. Esse processo é ilustrado esquematicamente na Figura 1.4.1. Na figura se observa que, após cada evento, é separado o produto P_i , referido ás partículas cuja liberação tenha sido atingida ($\Phi = 0,8$) ou cujo tamanho (P_{80}) represente mais ou menos essa situação.

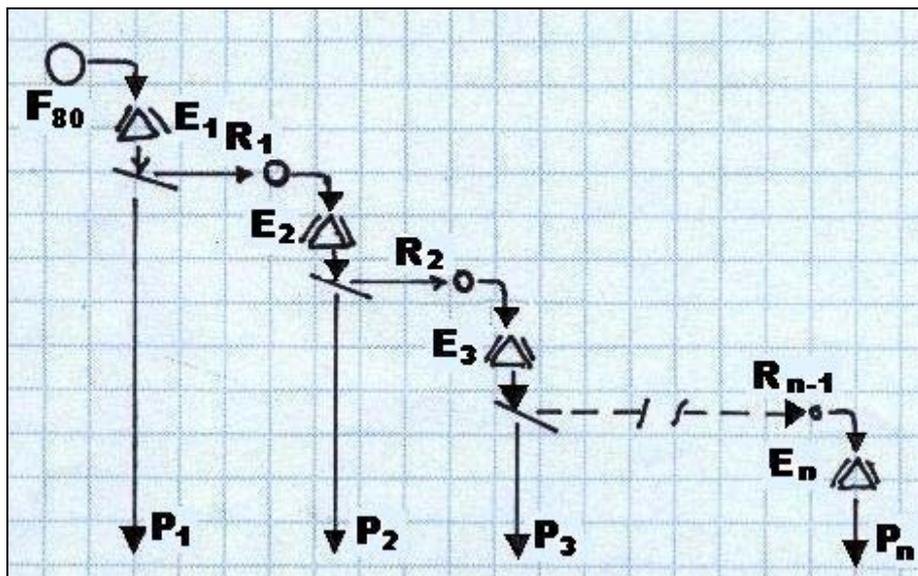


Figura 1.4.1 – Classificação Interna Ideal

Da forma ilustrada na Figura 1.4.1, a energia utilizada em cada evento é aplicada apenas sobre os fragmentos de rocha que precisam ser cominuídos. A rigor, o que realmente estamos querendo representar na figura é algum sistema que classifique e separe, antes de cada evento, as partículas cuja liberação é suficiente (Φ), mesmo que as partículas de ganga permaneçam de tamanhos maiores. Para efeitos de compreensão do problema, achamos que o leitor poderá imaginar esta situação e nos desculpar pela simplicidade da figura anterior. Na prática industrial, as particularidades das substâncias imersas na rocha facilitam ou dificultam esta classificação, como por exemplo, a gravidade específica e o tamanho (e peso dos grãos) de modo mais expressivo, e outras menos significativas como, por exemplo, a hidrofobia de algumas partículas sulfetadas e a plasticidade das micas, que são resistentes a qualquer mecanismo de cominuição.

1.4.2 O Caso Copperhill

Myers, J.F. (1957) discute com detalhes esse sub mecanismo de classificação interna (IMC – In Mill Classification) e estuda o comportamento de polpa de minério de Cobre, dentro do moinho, em camadas de 10 polegadas de profundidade, num corte transversal situado a 3 pés da boca de descarga, mais ou menos na metade do moinho. Trata-se do caso acontecido na usina de Copperhill (Tennessee Copper Co., EEUU) e moinho de bolas de 7 x 10 pés, que após muitos anos de operação em circuito fechado, teve a sua carga de bolas reduzida de 45 para 29% em volume, colocando em evidencia o mecanismo de classificação interna e a seletividade na moagem de minérios heterogêneos, comprovando a viabilidade de operar em circuito aberto e, junto com isso, inúmeros outros “paradigmas” da moagem foram rompidos. O moinho, operando a 63% de sólidos, produz um espessamento próximo de 75% na “zona de moagem”, definida pelo **Modelo Operacional** como a fração de volume mais profunda, onde normalmente se concentra a fase rocha, alvo do processo de cominuição, cuja densidade se aproxima do teor de saturação da polpa, ou seja, no ponto onde a polpa chega ao limite da sua fluidez, como ilustrado na **Figura 1.4.2**. A gravidade específica do minério estudado é de 4,2, que em relação à água equivale a 3,2. A velocidade de decantação numa polpa diluída (63% sólidos) produz o efeito ilustrado na Figura 1.4.2.

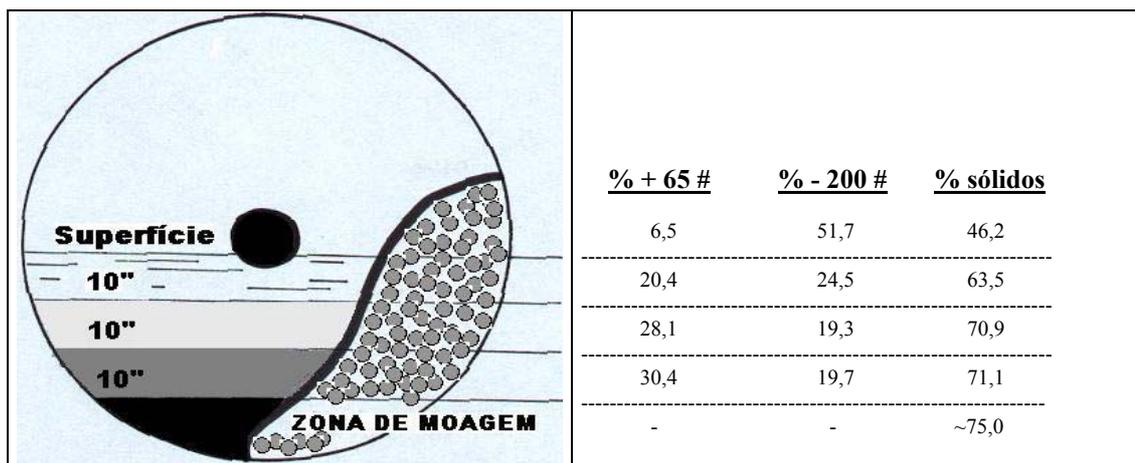


Figura 1.4.2 – Classificação Interna do Moinho Aberto, com Baixo Enchimento

J.F. Myers complementa os resultados com os seguintes comentários:

- Operações industriais que moem normalmente materiais constituídos por diferentes espécies minerais, com diferentes gravidades específicas, produzem diferentes curvas: % passante vs. mesh, para cada substância.
- Os minérios mais pesados são moídos mais finamente.
- Ao atingir o tamanho de liberação definido pelos métodos convencionais (P80), muito minério já foi moído mais que o necessário (*overgrinding*).
- A diluição da polpa que alimenta o moinho é fundamental para produzir a classificação interna. Numa certa faixa de diluição não se observam perdas de capacidade, ou seja, a “zona de moagem” mantém a sua alta densidade. Myers testou com bons resultados diluições próximas de 35% de sólidos na alimentação.

Os compromissos da operação de moagem são: processar um determinado fluxo mássico (ton/hora), atingir um determinado tamanho no produto (**P80**); produzir uma adequada liberação das partículas do nosso interesse (Φ); e, para preparação de material para o processo posterior de flotação, atingir o grau necessário de flotabilidade dos mistos grossos. Em muitos casos será necessária a remoagem destes mistos grossos para atingir melhor recuperação global do processo.

Examinando o caso de exemplo, **Bunting S. Crocker**, da Lake Shore Mines Ltd. (**Lewis F.M.**, 1953), comenta que a ganga constitui mais de 60% da massa alimentada ao moinho. Essa fração resultou menos moída pela condição de operação mais seletiva do moinho, quando comparada com a operação convencional de alto enchimento e em circuito fechado (35% contra 40% - 200 mesh). *Ou seja, o moinho não mói mais, apenas proporciona uma cominuição preferencial aos sulfetos.* **E.H. Crabtree**, Director of Milling, Eagle Picher Co., comenta que, devido à maior liberação dos sulfetos e ao tamanho mais grosso da ganga, mais Cobre é flotado com menor quantidade de reagentes. **J.F. Myers** (1957), baseado nos resultados mostrados na Figura 1.4.2, após avaliar as curvas granulométricas do produto da moagem em circuito aberto, com baixo enchimento, e comparando com o produto do sistema fechado convencional, de alto enchimento, conclui que, devido ao “fator de depressão” (definido por Myers para mostrar a seletividade produzida pela diferença de moagem entre a ganga e o minério), *o sistema de classificação interna mostrada no exemplo apresenta uma adequada liberação a 140 μ m, contra 112 μ m requeridas pelo sistema fechado convencional.*



Este aspecto é muito importante, pois o moinho operando em circuito aberto pode produzir a **mesma liberação do minério de interesse para um P80 superior**, confirmando que a operação de moagem nem sempre deve ser avaliada como um compromisso de obter um determinado P80, mas de liberação em geral. **Silva, J.C.F e outros (2004)** estudam o fluxo granulométrico da alimentação a flotação numa usina de concentração de rocha fosfática, após etapas de britagem e moagem a P80 de 149 μm . Os resultados da análise granuloquímica do material são apresentados na **Tabela 1.4.1** e nela se observa que os componentes mais pesados da ganga são moídos mais finamente e, pelo contrario, os componentes mais leves ficam concentrados nas frações mais grossas, como era de se esperar.

Tabela 1.4.1 – Análise da Alimentação a Flotação (**Silva, J.C.F. e Outros, 2004**)

Tamanho (μm)	Ganga pesada		Minério		Ganga leve		
	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
210	7,5	12,5	6,5	15,5	33	4,5	10
149	10,5	12,5	12	24	23	2,0	6,0
74	12,5	17,0	13	27	17	1,0	4,0
37	15,0	29,5	10,5	23	12,5	0,5	3,0

* Os valores referem-se ao teor de cada substância, %.

1.4.3 Como Melhorar a Classificação Interna

Diversos estudos foram desenvolvidos por **Yovanovic**, sobre a otimização da moagem via manipulação da polpa. No item 2.5 são estudadas diversas alternativas para melhorar a seletividade nos processos de moagem, de onde podemos resumir:

- A moagem em circuito aberto com baixo enchimento apresenta as melhores condições reológicas para o sistema;
- No interior do moinho a polpa atinge maior temperatura no circuito aberto que no circuito fechado. A carga circulante resfria o interior do moinho, jogando calor fora do sistema, no ambiente e tubulações de recirculação;
- Nas mesmas condições de densidade (% de sólidos) e de temperatura, a polpa “suja” com carga circulante possui maior viscosidade que a polpa nova (**Yovanovic, 1975**). Este conceito é muito importante, também, para as operações de hidrociclonação;
- Em processos que alimentam a operação de flotação é de muita conveniência a adição antecipada de reagentes, inclusive de espumante, que para o circuito aberto apresenta grande utilidade. Além do melhor condicionamento, aproveitando o moinho como reator e da redução do efeito de oxidação da superfície de determinadas partículas, que reduz a adsorção do coletor, esta nova condição incrementa o gradiente de separação hidráulica aproveitando a hidrofobia de determinadas partículas coletadas, evitando o excesso de moagem de partículas já liberadas;
- Outros reagentes específicos podem ser adicionados como depressores e os chamados “ajuda à moagem”, que colaboram para reduzir a viscosidade da polpa e aumentar o espessamento na “zona de moagem”;
- Em circuitos alcalinos a reação exotérmica $[\text{CaO} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2]$ devido à hidratação da Cal pode ser aproveitada adicionando diretamente a Cal granulada dentro do moinho.

Nas condições em que a classificação hidráulica não é efetiva (vale dizer, mais de 20% das partículas descarregadas pelo moinho são de tamanho superior ao P80 definido), o modelo determina as equações fundamentais do *processo auxiliar de classificação*, ou classificação externa, como será estudado no item 1.6.



1.5 Contato entre as Fases

1.5.1 Operações Descontínuas

En el estado no estacionario, los mecanismos son observados en función del tiempo de duración y, por lo tanto, de la cantidad de eventos de quiebra posibles de ejecutar durante el periodo o periodos evaluados, en equipos de bancada. Como en los sistemas discontinuos no existe la función transporte, que establece la tasa de retiro del producto (detalles en el ítem 1.5.2 a seguir), el inventario dentro del molino es el mismo y todas las partículas disponen del mismo tiempo de residencia. La homogeneidad de la fase roca es obtenida mediante la agitación proporcionada por el movimiento de la carga en función de la rotación del molino y, en estado no estacionario, el material sometido a la molienda está convenientemente homogeneizado dentro del equipo, venciendo otras fuerzas que concurren con el proceso, notadamente la fuerza de gravedad y la viscosidad, esta última aumentando significativamente junto con la reducción de tamaño de las partículas.

Nas operações descontínuas os mecanismos são observados em função do tempo de duração, e por tanto da quantidade de eventos de quebra possíveis de executar durante o período ou períodos avaliados, em equipamentos de batelada. Como nos sistemas descontínuos não existe a *função transporte*, que estabelece a taxa de retirada de produto (detalhes no item 1.5.2 a seguir), o inventário dentro do moinho é o mesmo e todas as partículas dispõem do mesmo tempo de residência. A homogeneidade da fase rocha é obtida mediante a agitação proporcionada pelo movimento da carga em função da rotação do moinho e, em estado não estacionário, o material submetido à moagem está convenientemente homogeneizado dentro do equipamento, vencendo outras forças que concorrem com o processo, notadamente a força de gravidade e a viscosidade, esta última aumentando significativamente junto com a redução de tamanho das partículas.

Nas operações de moagem, dependendo do tipo de circuito e de outras diversas variáveis, o tempo de obtenção do estado estacionário (τ) pode ser muito alto (acima de 40 minutos), além disso, para fins científicos, em experiências que pretendam simular processos via modelos cinéticos, não é possível acompanhar os eventos de quebra com o grau de precisão desejado, além da falta de linearidade dos mecanismos de quebra e de outros aspectos que desaconselham a utilização destas abordagens, principalmente quando se trata de minérios heterogêneos, como é a maioria deles. Na visão do **Modelo Operacional**, como será visto ao longo do **Capítulo 5**, que inclui os procedimentos laboratoriais, a melhor forma de executar testes com finalidades de pesquisa e projeto é justamente *em continuidade*, principalmente quando se trata de estabelecer relações de *scale-up* que considerem a seletividade na classificação observada na moagem de minérios heterogêneos e também a *Função Transporte*, que tão somente acontece nos processos contínuos. Os testes em sistema descontínuo poderiam ser aproveitados, ainda que de forma qualitativa, para efetuar testes comparativos entre tipos de minério, aproveitando alguns dos conceitos introduzidos pelas abordagens energéticas do fenômeno, desde que se conte com parâmetros de operação industrial já calibrados com a experiência do laboratório.

Para melhor compreensão geral do fenômeno de cominuição, em estado não estacionário, na **Figura 1.5.1** são mostrados resumidamente os dois mecanismos principais de cominuição natural num equipamento de moagem por batelada. Os eventos são avaliados dentro de um lapso de tempo, em intervalos discretos, onde centenas de micro-eventos poderiam ter acontecido nesse intervalo.

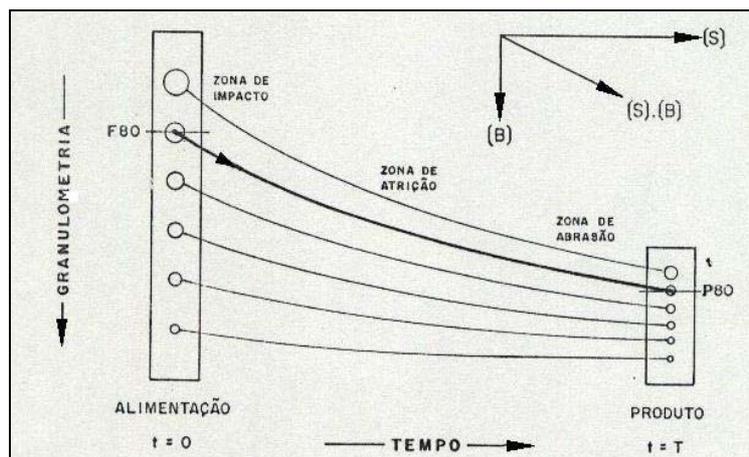


Figura 1.5.1 - Mecanismos em Sistema por Batelada

A grande confusão teórica com a qual convivemos até hoje é que o desenvolvimento científico dessa importante operação unitária tem evoluído apenas considerando a cominuição natural, e só para processos homogêneos, onde é apenas o tamanho das partículas a variável de controle do processo. Para um minério heterogêneo, como são a maioria dos minérios, é de se esperar que componentes provenientes de diferentes partes da jazida possuam diferentes características de liberação. O circuito de moagem, quando erradamente é controlado apenas pelo tamanho do produto e não pela liberação, não responde a essas mudanças de minério (Malghan, S.G., 1986; e McIvor, R.E. e Finch, J.A., 1991).

Outra desvantagem dos trabalhos em escala descontínua é que, para operações posteriores de flotação, como os testes de laboratório são normalmente executados com amostras moídas em moinhos do tipo batch, a liberação do íon ferro a partir dos corpos moedores é diferente na usina, dependendo do revestimento do moinho, meio de moagem e de outros fatores. Além disso, como o moinho de laboratório é fechado, não acontece uma suficiente aeração na polpa. Esses fatores possuem um profundo efeito sobre as condições físico-químicas da polpa, especialmente nos sulfetos, que consomem grandes quantidades de oxigênio (Suttill, K.R., 1990).

1.5.2 Operações Contínuas

O **Modelo Operacional** considera que existe classificação hidráulica dentro do moinho, classificação esta que é suficiente para operar em circuito aberto, em determinadas condições de processo (produto relativamente grosso, baixo nível de enchimento de corpos moedores, etc.). Experiências feitas na Noruega (Forsund B. e outros, 1988) para moagem de minério de ferro, demonstram que a classificação interna funciona corretamente abaixo de 22% de enchimento, produzindo em aberto a mesma granulometria de descarga que outro moinho operando em circuito fechado, e ainda, com 16% a menos de consumo específico de energia. A existência de classificação interna dentro do moinho, para baixos níveis de enchimento, foi confirmada industrialmente na moagem de minério de ferro em moinho Sydvaranger de bolas *single-stage* de 6,5 metros de diâmetro (Forsund e outros, 1988) e também para minério sulfetado de Cobre (Revista **E&MJ**, 1953 e Myers, 1957). A performance do moinho Sydvaranger, operando com 22% de enchimento de bolas, foi comparada com a dos outros moinhos da usina, operando em circuito fechado. Os moinhos em circuito fechado consomem 29% a mais de energia específica que o moinho em aberto.



O novo moinho, além disso, apresentou uma redução de 33% no consumo de revestimento e 14% no consumo de bolas. Tudo isto avaliado *durante cinco anos contínuos de operação*, como resumido na **Tabela 1.5.1**.

Tabela 1.5.1 – Circuito Aberto Moagem Minério de Ferro (Forsund e outros, 1988)

ITEM	MOINHO ABERTO	MOINHOS FECHADOS
Enchimento de Bolas, %	22	35 – 40
Produto, % - 208 μ m	82,4	80,0
Consumo Bolas, g/t	653	759
Consumo Liners, g/t	44	66
Consumo Específico de Energia, kWh/t	7,90	10,22

O que foi dito é facilmente observável na operação de moinhos industriais, em circuito aberto. Quando um sistema começa a operar, demora algum tempo antes de atingir o estado estacionário, de 30 a 40 minutos, dependendo do processo (o circuito fechado demora muito mais tempo, talvez 3 a 4 vezes mais, dependendo da % de carga circulante). Neste ponto nota-se que a densidade da polpa na descarga, no primeiro sinal de vazamento pelo “*overflow*”, atinge valores muito próximos aos da água e logo vai crescendo até chegar ao mesmo valor da polpa alimentada ao moinho (estado estacionário). **Rogovin e Herbst** (1989) estudam este aspecto e se referem a trabalho anterior de Herbst e Vanderbeek (1983), os quais, mediante estudos de RTD, que a água consome menos tempo que os sólidos dentro do moinho. Rowland e Kjos (1975) comentam que a densidade da polpa no interior do moinho é maior que na descarga (e na alimentação) pelo diferente tempo de residência entre a água e o minério. A **Figura 1.5.2** ilustra este conceito; na mesma, o tempo zero é o tempo de residência da água, e o tempo infinito t_{∞} é o tempo de residência da partícula de maior dureza que abandona o moinho. Por sua vez, isto produz um aumento de densidade dentro do moinho (ou seja, aumenta a percentagem de sólidos), produto da sedimentação ou classificação hidráulica das partículas, em geral. Chega-se a um equilíbrio no estado estacionário com uma distribuição do tempo de residência da forma ilustrada na Figura 1.5.2.

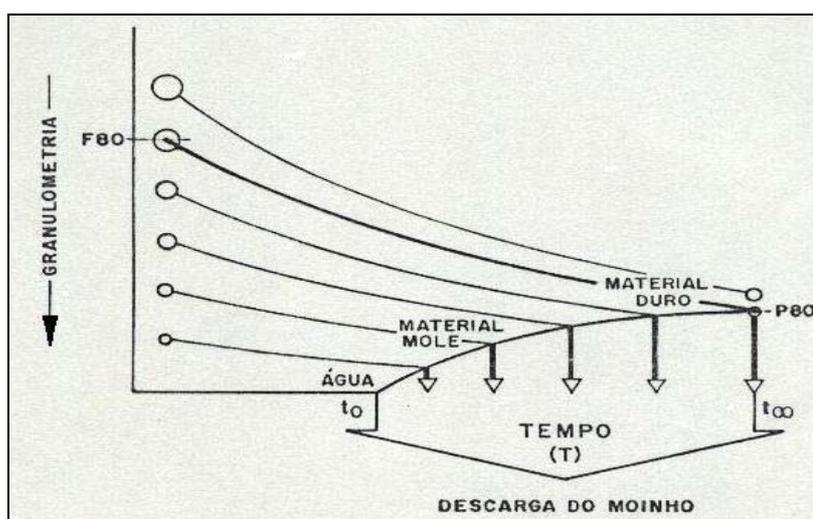


Figura 1.5.2 – Função Transporte em Sistema Estacionário

O **Modelo Operacional** apresenta equações específicas para descrever este fenômeno secundário, em função de diversas variáveis que podem melhorar ou prejudicar a classificação hidráulica.



Neste último caso, o modelo indica as condições limites acima das quais seria necessário um *equipamento auxiliar de classificação* (em circuito fechado) para completar o processo de classificação obtido de forma insuficiente no próprio moinho. Nas operações de cominuição o *fator tempo* não é muito utilizado nos mecanismos de scale-up, desde que atendidos os tempos mínimos para a Quebra (TZ), na zona de moagem, e o tempo utilizado pela Função Transporte (t), que retira oportunamente o material liberado. A *aplicação específica da energia* é o mecanismo macroscópico utilizado por todas as abordagens, de modo que as considerações que este texto faz sobre estado estacionário e não estacionário servem principalmente para conhecer os mecanismos envolvidos e tentar maximizar a seletividade do processo, atuando sobre as variáveis possíveis de manipular.

1.5.3 A Função Transporte

Levin J. (1992) apresenta os resultados de moagem para minério de Ouro em diferentes tempos de moagem (medido indiretamente através da quantidade de rotações do moinho – tempo “macroscópico” da ação massiva dos corpos moedores), em operação descontínua, a seco, no moinho padrão e nas condições estabelecidas por Bond (detalhes no item 4.2.4). Observa-se claramente que, na moagem a seco, por batelada, da forma estabelecida por Bond, existem três etapas no processo de moagem. Na primeira etapa, o Work Index Operacional (W_{io} , kWh/t) cai rapidamente, de um valor muito alto para uma faixa mínima observada na etapa seguinte, situada entre 600 a 1100 rotações (9 a 15 minutos, considerando 70 rpm do moinho). Nesta segunda etapa, o W_{io} aumenta de forma gradativa junto com o tempo e, na terceira etapa, o W_{io} volta a subir fortemente, pela acumulação de finos, como ilustrado na **Figura 1.5.3**.

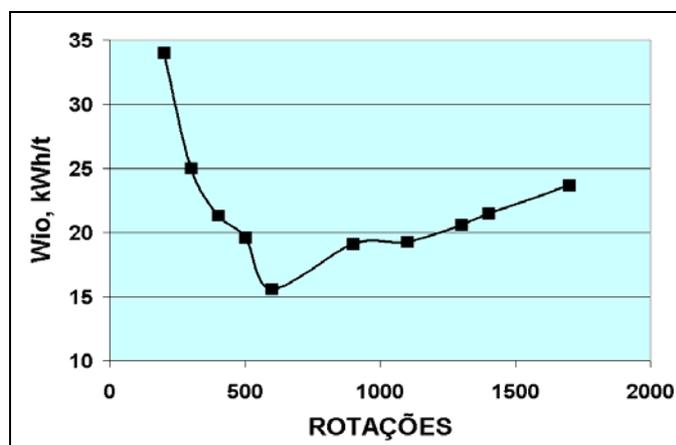


Figura 1.5.3 – Variação do W_{io} com o Tempo de Moagem em Batelada (Levin J., 1992)

Na ótica do **Modelo Operacional** podemos concluir em algumas interessantes observações sobre este teste, com muita coerência com os postulados do Modelo Operacional. Simulações feitas em computador tinham apontado que na Função Transporte (retirada de produto), num circuito aberto, a água possui um tempo de residência entre 10 a 13 minutos, dependendo do processo e da densidade da polpa alimentada. Experiências práticas com minério de Ouro (Yovanovic, 1991) mostraram que, em moinho de grelha, a retenção de finos dentro do moinho reduz a capacidade de produção e aumenta fortemente o valor de potencia aplicada ao moinho, na forma de picos de carga; a forma de lidar com este problema, na usina, foi justamente reduzir a % de sólidos na alimentação (agregando mais água), permitindo a retirada oportuna dos finos produzidos.



Os modelos do **tipo energético**, derivados da Lei de Bond, não consideram este aspecto de maneira fenomenológica, mas a determinação experimental do “*work index*” leva implícita a correlação com o moinho de referência das experiências originais de Bond (8,0 pés de diâmetro interno, 70% da velocidade crítica, 35% de enchimento de bolas, 77% de sólidos, 250% de carga circulante). Qualquer mudança das condições operacionais de referência invalida a extrapolação direta do “*work index*”, motivo pelo qual, também baseado em experiências práticas, **Rowland (Mular, A.L. e Bhappu, R.B., 1980)** cria novos fatores de correção. Estes fatores não resolvem a maior parte das variáveis operacionais envolvidas.

- **EF1**, para processos de moagem a seco, multiplica-se por 1,2 o consumo específico de energia obtido para a moagem a úmido, buscando compensar as dificuldades de movimento das partículas dentro do equipamento.
- **EF6, EF7**, tentam corrigir o consumo específico de energia para razões de redução (fator F80/P80) superiores a certos valores considerados como base, tanto para moinhos de barras como de bolas. Este aspecto, a nosso ver, está relacionado à necessidade de altos tempos de residência dentro do moinho.

Os modelos do **tipo cinético**, pelo fato de não trazerem implícita uma correlação experimental com processos no estado estacionário, enfrentam as seguintes dificuldades:

- 1 Adaptar os parâmetros **S** e **B** às diversas condições operacionais do processo industrial (% de sólidos, carga de bolas, % da velocidade crítica, etc.);
- 2 Transformar o tempo de residência “batch” em tempo no estado estacionário.

O primeiro tópico é abordado de maneira mais profunda por **Austin L. G. (1982, 1984)**, resumindo o conjunto de condições operacionais numa expressão que relaciona de forma volumétrica o quociente minério/bola (U). Austin define valores ótimos acima ou abaixo dos quais o processo entra em ineficiência. Austin chama de ineficiência indireta quando o moinho entra em “*overflowing*”, ou seja, quando o inventário de material é superior, em volume, ao dos corpos moedores ($U > 1$). O caso contrário é chamado de “*underfilling*”.

Na distribuição real do tempo de residência, a abordagem cinética divide-se em duas interpretações principais, ambas radicalmente opostas: **Herbst e outros** (diversas referências, em parceria com **Lo, Y.C., Rajamani, K., Rogovin Z. e outros**), aplicam novamente conceitos de engenharia química para distribuir o tempo (RTD, ou *Residence Time Distribution*), criando um modelo auxiliar de transporte utilizando a analogia de N - misturadores em série. Na nossa visão, como relatado no item anterior, o que acontece é que existe classificação hidráulica dentro do próprio moinho. Essa classificação não é perfeita e depende, entre outros aspectos, da granulometria do produto, porcentagem de sólidos e, quase que fundamentalmente, da porcentagem de enchimento de corpos moedores, aspectos que os Autores citados parecem não considerar no seu modelo.

Austin e outros (1982, 1984); Klimpel R.C. e outros (1989); Nomura, S. e Tanaka, T. (1989) e Gao, M.W. e Forsberg E. (1989), além de manifestarem sua rejeição ao modelo de transporte baseado em RTD, assumem que não existe distribuição de tempo de residência dentro do moinho e, para uma relação volumétrica minério/bola igual à unidade ($U = 1$), a massa total que se encontra dentro do moinho é transportada da maneira chamada de “*fully mixed*”, onde água, grossos e finos teriam o mesmo tempo de residência dentro do moinho. No conceito de Austin, existe uma combinação ótima entre a carga de bolas e a carga circulante (para o caso de circuitos fechados) que conduzem à condição $U = 1$, acima da qual o moinho entra em “*overflowing*” ou sobre carregamento.



Austin considera como carga ao total de massa dentro do moinho; para o Modelo Operacional, a carga de minério é apenas aquela compreendida na *zona de moagem*. Simulações feitas em computador (Yovanovic e Moura, 1991) indicam que, para se atingir a condição sugerida por Austin ($U = 1$), o moinho requer um enchimento de bolas próximo a 42%, dependendo da percentagem de carga circulante, condição esta muito longe do valor ótimo calculado pelo **Modelo Operacional** (20-25%), o que conduziria a valores de “U” superiores a 1. O modelo de tipo matricial sugerido por Lynch, A.J. (1977), considera o mesmo conceito “*fully-mixed*” de Austin, assumindo só um fator de probabilidade que define a proporção de partículas atingidas e outras não atingidas pelos corpos moedores.

Na falta de medidas experimentais o **Modelo Operacional** propõe uma expressão empírica para o cálculo da fração de sólidos da polpa no interior do moinho, em função da gravidade específica das substâncias mais pesadas, a granulometria do produto (P80) – que influencia a viscosidade da polpa – e outros aspectos. A densidade máxima possível de obter na zona de moagem (no fundo do moinho) é muito próxima da densidade de saturação da polpa alimentada, ou seja, a densidade observada no *underflow* do hidrociclone. Desta forma, é possível obter o tempo estimado de residência da água e finos, e o tempo médio total de residência dos fragmentos de rocha dentro do moinho (TZ, definido na equação 1.23), valor que é considerado na determinação do **Índice de Cominuição** introduzido pelo modelo.

Os *moinhos de grelha* produzem uma certa retenção de massa dentro do moinho, a qual poderia ser útil para altos enchimentos (evitando o refugo da carga moedora pela boca do moinho), mas envolve altos consumos de energia, deficiente função de transporte na retirada de produto e inexistente classificação hidráulica dentro do moinho. Experiências industriais (Yovanovic, 1991) com moinho de bolas de descarga com grelha, mostraram que a potencia aplicada sobe de forma pronunciada junto com o incremento da densidade da polpa alimentada (demonstrando a acumulação de massa). A operação foi normalizada, com máxima capacidade de produção, para densidades próximas a 50 ou 55% de sólidos. Em resumo, a *função transporte* é fundamental para obter determinadas características no produto da moagem; um alto fluxo de transporte “arrasta” partículas maiores, dentro de certos limites que serão vistos no **Capítulo 2**; ou seja, **a retirada oportuna do produto é tão importante quanto a própria cominuição que acontece na zona de moagem dentro do moinho**. Nas condições em que a classificação hidráulica não é efetiva (vale dizer, mais de 20% das partículas descarregadas pelo moinho são de tamanho superior ao P80 definido), o modelo determina as equações fundamentais do *processo auxiliar de classificação*, como será visto no item 1.6.

MODELOS ENERGÉTICOS (Condição Padrão de Bond) D = 8,5 pés CC = 350% NE = 35% VC = 70% PS = 77%	
MODELOS CINÉTICOS	
Herbst e Outros	$\tau = f(\text{RTD})$
Austin e Outros	$\tau = T$ (Fully Mixed)
MODELO OPERACIONAL Fator de Espessamento divide o tempo $\tau \rightarrow t$ (Água, Transporte) $\tau \rightarrow \text{TZ}$ (Rocha)	

QUADRO RESUMO FUNÇÃO TRANSPORTE



1.5.4 Gradiente e Forças Impulsoras

En la Figura 1.5.3 se ilustra un esquema de movimiento de los fragmentos de la quiebra después de un evento E_i , donde las partículas con algún grado significativo de liberación avanzan impulsadas por la función transporte y por la tendencia a la levitación (sea por condición natural o inducida, o también por desplazamiento másico motivado por la preferencia de otras partículas afondar). Los fragmentos de roca, que todavía precisan ser cominuidos, avanzan en el sentido descendente, sufriendo sedimentación motivada por el mayor peso individual del fragmento o por la mayor gravedad específica de las sustancias presentes en aquel fragmento.

Na Figura 1.5.4 é ilustrado um esquema de movimentação dos fragmentos da quebra após um evento E_i , onde as partículas com algum grau significativo de liberação avançam impulsionadas pela função transporte e pela tendência à *levitação* (seja por condição natural ou induzida, ou também por deslocamento mássico motivado pela preferência de outras partículas afundarem). Os fragmentos de rocha, que ainda precisam ser cominuidos, avançam no sentido descendente, sofrendo *sedimentação* motivada pelo maior peso individual do fragmento ou pela maior gravidade específica das substâncias presentes naquele fragmento.

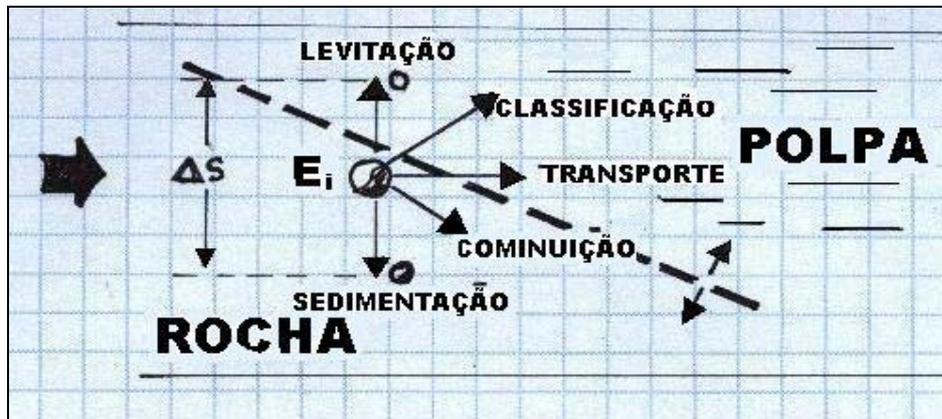


Figura 1.5.4 – Gradiente e Forças Impulsoras

Na Figura 1.4.2 pudemos observar que as partículas grossas e as finas ocupam distinta posição vertical dentro do moinho, da forma resumida na Tabela 1.5.2.

Tabela 1.5.2 – Distribuição Vertical de Partículas Caso Copperhill (Myers, J.F, 1957)

Profundidade (polegadas)	% + 65 mesh (+ 210 μm)	% - 200 mesh (% - 74 μm)
Superfície	6,5	51,7
10	20,4	24,5
20	28,1	19,3
30	30,4	19,7

O gradiente que impulsiona a classificação interna (ΔS) pode ser deliberadamente maximizado entre as fases rocha e polpa, estabelecendo condições operacionais adequadas á *moagem seletiva*, como descrito resumidamente no item 1.4.3 e em detalhe no próximo **Capítulo 2**. Como observado na Tabela 1.5.2, entre 210 e 74 μm existe algum tamanho de equilíbrio, cujas partículas se distribuem homoganeamente dentro do moinho, o qual depende de numerosos fatores, tais como o tamanho do produto (P80) e a viscosidade da polpa. Na Figura 1.5.5 é ilustrado este efeito.

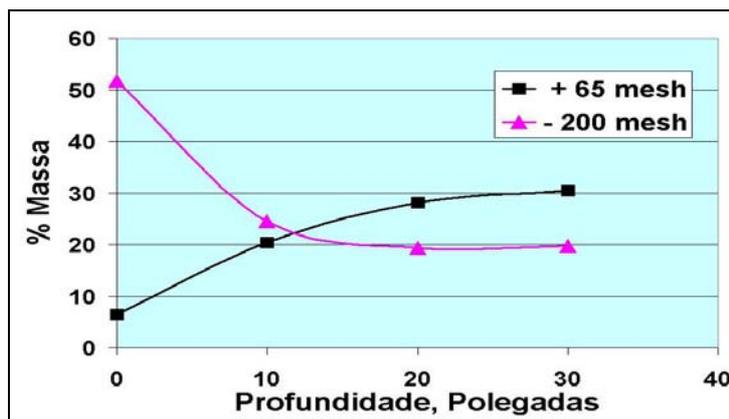


Figura 1.5.5 – Distribuição Vertical de Partículas dentro do Moinho (Myers, J.F, 1957)

Os mecanismos de **cominuição** (eventos E_1 até E_N) e de **classificação interna** operam nas respectivas fases *rocha* e *polpa*, de acordo com as seguintes forças impulsoras:

Levitação

As partículas se dirigem até a camada de transporte, na fase polpa (ou na corrente de ar, nos processos a seco), quando possuem algumas das seguintes características: a) possuem um tamanho ou peso inferior que a média das partículas dentro do moinho; b) são finas demais para afundar e, em estado de suspensão, são arrastadas pelo fluxo da camada de transporte e c) possuem características hidrofóbicas e são transportadas até a superfície. Quando a moagem é feita para preparar o material para o processo de flotação, é altamente conveniente a adição de reagentes dentro do moinho, permitindo que as partículas mais hidrófobas, mesmo de maior tamanho, floten até a superfície. O efeito observado nos processos unitários de flotação de grossos, chamada de “*flash flotation*”, é um exemplo do evento que poderia ser antecipado já dentro do moinho.

Sedimentação

O fenômeno natural de sedimentação acontece sempre nas polpas, onde as partículas maiores ou mais pesadas sedimentam até o fundo do equipamento, como mostrado na Tabela 1.5.2 e Figura 1.5.4 anteriores. O processo de cominuição é executado na *zona de moagem*, aproximadamente no volume equivalente a 20 ou 25 % do volume interno do moinho, exatamente o volume ocupado pela carga otimizada de corpos moedores (JA), como será visto mais adiante. O desejável é incrementar a sedimentação (aumentar a densidade da polpa no fundo do moinho) para concentrar a energia aplicada pelos corpos moedores acima das partículas que realmente interessa cominuir.

Para maximizar o gradiente de classificação, pelo lado da sedimentação, são recomendadas entre outras as seguintes ações operacionais: a) moagem em circuito aberto; b) baixo enchimento de corpos moedores, aumentando a profundidade da camada de sedimentação; c) baixo % de sólidos na polpa alimentada ao moinho (entre 55 a 60 % de sólidos, evitando o excessivo incremento da viscosidade da polpa dentro do moinho); d) baixa velocidade de rotação (60 a 65 % da velocidade crítica) e baixa altura dos “*lifters*” do revestimento, para evitar a turbulência da polpa; e) baixa velocidade de transporte, para evitar o arraste hidráulico de partículas (o fato de não incorporar cargas circulantes junto com a alimentação é um bom fator em benefício deste fluxo); f) maior área de sedimentação, o qual é conseguido com altas relações L/D (comprimento/diâmetro do moinho); g) melhoria das condições reológicas da polpa, em geral (aumento de temperatura, adição de reagentes, etc.).



Todos os argumentos indicados para incrementar a seletividade das operações de moagem contribuem simultaneamente para a obtenção dos menores consumos de energia, o que indica a vantagem dos equipamentos convencionais operando em circuito aberto com baixo enchimento, como ilustrado na **Tabela 1.5.3** e na **Figura 1.5.6** a seguir.

Tabela 1.5.3 – Comparação de Filosofias de Moagem

MOAGEM SELETIVA Recomendada pelo Modelo Operacional	MOAGEM HOMOGÊNEA Cultura Tecnológica Convencional
• Preparação com britagem convencional, em circuito aberto	Preparação com britagem em circuito fechado, quando a moagem a seguir é convencional
• Introduzir etapa de pré-concentração após britagem terciária com britador de impacto. Não todo o R.O.M. é minério	O projeto considera que todo o R.O.M é minério, por tanto é britado de forma homogênea
• Primeira opção (alternativa base) de projeto deve ser a moagem convencional	Tendência para “dirigir” o uso da moagem semi-autógena como primeira opção
• Circuito aberto	Circuito fechado – paradigma obrigatório
• Sem carga circulante (do anterior)	Altas cargas circulantes (300 a 500 %)
• Baixo nível de enchimento (20 a 30 %)	Alto nível de enchimento (> 40 %)
• Baixa densidade da polpa alimentada (55 a 60 % de sólidos) – baixa viscosidade	Alta densidade (75 a 80 % de sólidos) Alta viscosidade
• Baixa velocidade de rotação (60 a 65 % da velocidade crítica)	Alta velocidade de rotação (75 a 80 % da velocidade crítica)
• Alta relação L/D Alta área de sedimentação	Baixa relação L/D Baixa área de sedimentação
• Diâmetro não superior ao necessário	Máximo diâmetro possível
• Baixa velocidade de transporte $Q = f(\text{TPH})$	Alta velocidade de transporte $Q = f(\text{TPH} + \text{carga circulante})$
• Alto tempo de residência	Baixo tempo de residência
• Baixa altura dos <i>lifters</i>	Excesso de altura dos <i>lifters</i>
• Potencia instalada de acordo a motores padronizados de fabricação local	Máxima potência instalada. Motores que não possam ser fabricados localmente
• Mínima potência aplicada	Máxima potência aplicada (<i>High Energy</i>)
• Mínimo consumo específico de energia	Máximo consumo específico de energia
• Mínimo consumo de corpos moedores	Máximo consumo de corpos moedores
• Mínimo consumo de revestimentos	Máximo consumo de revestimentos
• Melhor seletividade nas operações posteriores	Menor seletividade das partículas cominuidas
• Menor produção de superfinos	Maior produção de superfinos
• Otimização Operacional – Manual, antes de implantar sistemas automáticos.	Implantar Sistemas Especialistas sem antes “otimizar” realmente o processo
• Estabelecimento de cultura tecnológica nacional. Fomentar a fabricação de equipamentos padronizados	Alianças estratégicas com consultores e fornecedores de equipamentos (existe apenas um fornecedor mundial) e de corpos moedores

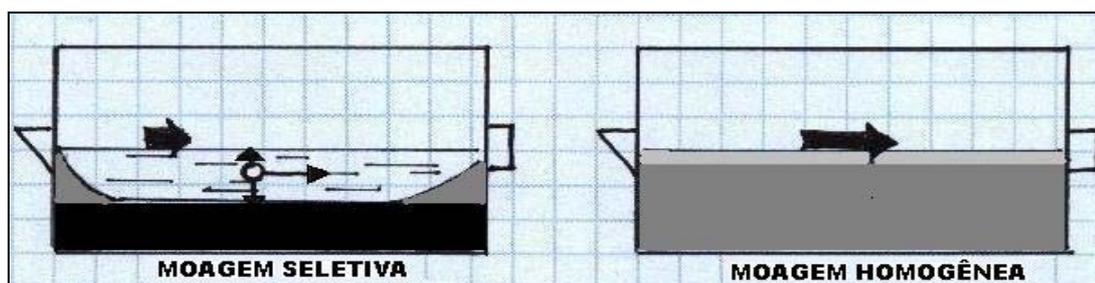


Figura 1.5.6 – Filosofias de Moagem



1.6 Classificação Externa

1.6.1 A Classificação Externa

La utilización de circuitos cerrados de molienda es generalmente aceptada, casi sin contestación, y es producto de una tradición de la propia determinación de los parámetros energéticos del modelo de Bond, cuya experiencia en laboratorio es hecha para circuitos cerrados. El molino industrial que utilizó Bond como referencia operaba con 35% de llenado de bolas y con 350% de carga circulante, no permitiendo producir una adecuada clasificación hidráulica dentro del molino. Esta deficiencia operacional, para condiciones de alto nivel de llenado, es compensada por C. Rowland (Mular e Bhappu, 1980), que define un nuevo factor de ineficiencia, denominado EF2. Este factor aumenta en 20% el consumo específico de energía para molinos operando en circuito abierto, cuando la referencia de control granulométrico está basada en P80 (80% de partículas abajo del tamaño P). El abordaje energético presenta en este fenómeno secundario su punto más débil, porque no considera ninguna corrección, ni estima un punto óptimo de carga circulante para circuitos cerrados, permitiendo que el estado estacionario sea alcanzado por la simple satisfacción hidráulica del propio equipo clasificador.

A utilização de circuitos fechados de moagem é comumente aceita, quase sem contestação, e é produto de uma tradição da própria determinação dos parâmetros energéticos do modelo de Bond, cuja experiência em laboratório é feita para circuitos fechados. O moinho industrial que utilizou Bond como referência operava com 35% de enchimento de bolas e com 250% de carga circulante, não permitindo produzir uma adequada classificação hidráulica dentro do moinho. Esta deficiência operacional, para condições de alto nível de enchimento, é compensada por C. Rowland (Mular e Bhappu, 1980), que define um novo fator de ineficiência, denominado EF2. Este fator aumenta em 20% o consumo específico de energia para moinhos operando em circuito aberto, quando a referência de controle granulométrica é baseada em P80 (80% de partículas abaixo do tamanho P). A *abordagem energética* apresenta neste fenômeno secundário seu ponto mais fraco, porque não considera nenhuma correção, nem estima um ponto ótimo de carga circulante para circuitos fechados, permitindo que o estado estacionário seja atingido pela simples satisfação hidráulica do próprio equipamento classificador. Por outro lado, devemos lembrar que, em circuito aberto, a mesma liberação da substância de interesse poderia ser obtida com um produto de P80 maior.

Os *modelos cinéticos* introduzem um modelo auxiliar para o que chamam de “função classificação” (diferente do conceito de *classificação interna* introduzido nesta abordagem), cujo desenvolvimento teórico, a nosso entender, também ficou muito longe das características reais do fenômeno. **Herbst e outros** (diversas referências), ainda sem divulgar detalhadamente seu modelo, criam uma rotina de cálculo de alta complexidade, que pretende representar a eficiência do classificador e carga circulante de maneira *independente das causas* que motivaram a necessidade de recircular massa, como veremos mais adiante. **Lynch e outros** (diversas referências), por sua parte, apresentam rotinas que “fecham” matematicamente o circuito pela simples *probabilidade* de retorno daquelas partículas não atingidas por corpos moedores.

O **Modelo Operacional** reconhece a classificação hidráulica como fenômeno auxiliar produzido no próprio moinho, fenômeno que já foi comprovado industrialmente. O erro da classificação hidráulica pode ser medido nas operações industriais ou estimado matematicamente em função do nível de enchimento de bolas, da percentagem de sólidos, da granulometria do produto e da espessura da camada livre de polpa em transito pelo moinho.



O equipamento de classificação utilizado para o fechamento do circuito deve ser coerente com a filosofia de cominuição utilizada, além de considerações sobre o método utilizado (seco ou úmido). Deste modo, nas operações de britagem e nalgumas operações homogêneas de moagem ($F \rightarrow P$) poderiam utilizar-se peneiras, que classificam as partículas apenas pelo seu tamanho. Porém, a grande maioria dos processos de moagem acontecem com minérios com diferentes graus de heterogeneidade, de modo que a separação por tamanho não faz muito sentido. Como nestes moinhos a classificação interna acontece por sedimentação, é este o critério que deve ser utilizado no fechamento do circuito, mediante a utilização de hidroclassificadores. Os hidrociclones são atualmente os equipamentos mais utilizados.

A decisão de fechamento do circuito depende do destino a ser dado a um relativamente pequeno grupo de partículas expurgadas pelo moinho, que podem ser remoídas em outra etapa ou realimentadas ao mesmo moinho, como acontece nos sistemas *single-stage*. Esta pequena parcela de massa chamaremos de *carga circulante natural ou necessária* para o sistema. Estima-se que, por experiências práticas em equipamentos industriais (Yovanovic, 1975-1976), para P80 próximo a 150 μm , o erro absoluto de classificação interna do moinho com alto enchimento ($> 40\%$) não deve ser superior a 45%, ou seja, em caso de abrir o circuito e atingir novo estado estacionário, com a mesma capacidade de produção, 45% das partículas descarregadas podem ser de tamanho superior ao P80 pretendido. Por outro lado, é fato conhecido que o erro absoluto de classificação de um hidrociclone, operando em circuito aberto, é próximo de 10% (90% de eficiência). Seja:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_m \times \mathbf{E}_c \quad (1.24)$$

Onde:

\mathbf{E} = eficiência conjunta do sistema operando teoricamente em circuito aberto;

\mathbf{E}_m = eficiência absoluta do moinho;

\mathbf{E}_c = eficiência absoluta do classificador.

Ao se fechar o circuito, demonstra-se por indução matemática (ver demonstração em quadro anexo, da **Figura 1.6.1**) que a carga circulante no estado estacionário é dada pela seguinte expressão:

$$\mathbf{C} = \frac{\mathbf{1} - \mathbf{E}}{\mathbf{E}} \quad (1.25)$$

Colocando-se na Equação 1.24 os valores das eficiências $\mathbf{E}_m = 0,55$ e $\mathbf{E}_c = 0,9$ e substituindo-se o valor de \mathbf{E} na Equação 1.25, é evidente que a carga circulante, no pior dos casos, dever ser próxima a 100 % na malha de referência utilizada (neste caso de 100 mesh, ou 149 μm). O excesso de carga circulante observado na quase totalidade dos circuitos industriais de moagem (300 a 500 %), deve-se simplesmente ao erro hidráulico do próprio sistema de classificação, cuja combinação “*apex/vortex*” deve ser satisfeita hidraulicamente ao se atingir o estado estacionário. O que muitas vezes passa despercebido é que o classificador impõe sua performance ao moinho, e não o contrário, como deveria ser.

O interesse dos fabricantes sobre este paradigma é muito grande, já que a capacidade da bomba e dos equipamentos de classificação (inclusive algumas operações intermediárias como a separação gravítica, por exemplo) deve ser dimensionada para todo o fluxo, ou seja, o fluxo real de alimentação mais a carga circulante, que para altos valores faz triplicar ou quadruplicar o investimento em equipamentos auxiliares. O aumento de capacidade de tratamento de um moinho pela via do aumento da carga de bolas, **não recomendado pelo Modelo Operacional**, implicaria no fechamento do circuito a partir de mais ou menos 30% de enchimento, o que requer o uso de um equipamento auxiliar.



E_m = eficiência absoluta do moinho;
 E_c = eficiência absoluta do classificador.
 P = Produto; F = Alimentação, (ton/hora)
 $P = F \times E_m \times E_c$ (circuito aberto)
 Primeira Carga Circulante:
 $C_0 = F - P = F(1 - E_m \times E_c)$
 Sejam $F = 1$ e $E = E_m \times E_c$
 $C_0 = 1 - E$
 Segunda Carga Circulante:
 $C_1 = (1 + C_0) \times (1 - E)$
 “
 $C_n = (1 + C_{n-1}) \times (1 - E)$
 Para $n = \infty$ $C_n = C_{n-1}$
 $C = (1 + C) \times (1 - E)$
 $C = \frac{(1 - E)}{E}$

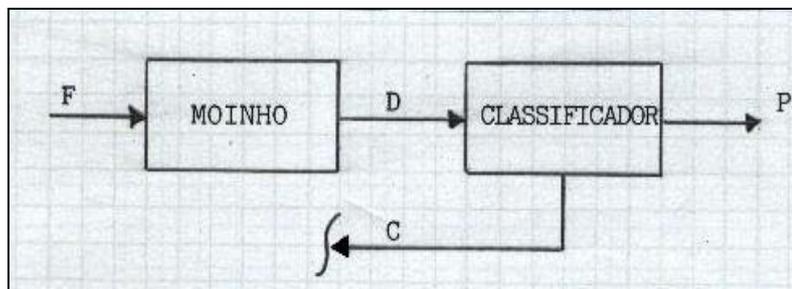


Figura 1.6.1 – Carga Circulante em Estado Estacionário (Yovanovic)

Na **Figura 1.6.2** pode-se observar esquematicamente o efeito da carga circulante na granulometria de descarga do moinho. As partículas mais grosseiras, descarregadas em sistemas de alta carga circulante, reduzem a vida útil dos revestimentos da bomba e aumentam o refugo de partículas de maior tamanho e até de corpos moedores. Junto com o aumento da carga circulante, a distribuição de tempo dentro do moinho aproxima-se ao “fully-mixed”.

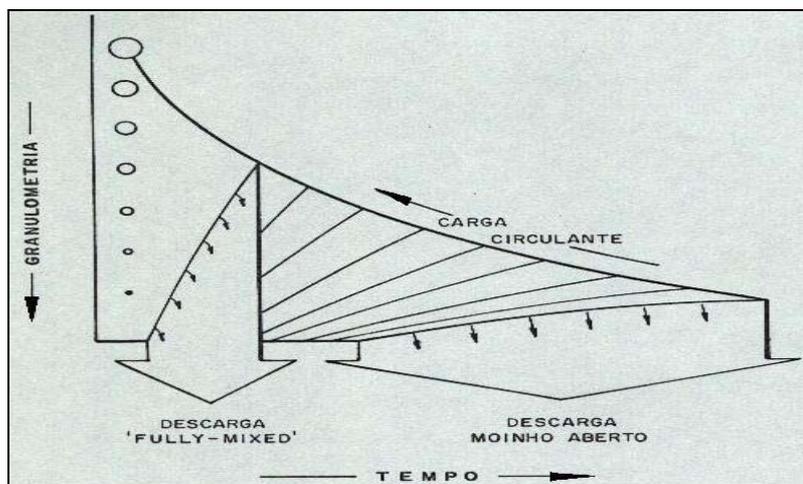


Figura 1.6.2 – Efeito da Carga Circulante na Função Transporte



Para satisfazer a Equação 1.25 a carga circulante terá que aumentar à medida que o nível de enchimento de bolas aumenta. Medindo-se a granulometria do produto no moinho aberto, processando a mesma tonelagem que em circuito fechado, verifica-se a eficiência absoluta da classificação hidráulica do moinho (E_m) e, utilizando-se as equações 1.24 e 1.25, calcula-se a carga circulante *necessária* pelo sistema. Esta simples rotina de cálculo elimina de forma definitiva qualquer arbitrariedade na estipulação da carga circulante.

1.6.2 Continuidade em Circuitos Fechados

No caso de circuitos fechados, o tempo médio de residência do minério (base seca) é dado por:

$$T_m = TM / FM \quad (1.26)$$

Onde, FM = Fração de massa alimentada no moinho, em relação à alimentação nova:

$$FM = 1 + C/100 \quad (1.27)$$

A eficiência total de cominuição do sistema para produzir e classificar partículas finas (abaixo de P80) foi deduzida pelo **Modelo Operacional**, no estado estacionário, da seguinte forma:

$$E = \frac{E_m \times E_c}{[1 - E_m (1 - E_c)]}, \text{ para circuitos fechados} \quad (1.28)$$

Onde,

E_m = relação entre a massa de partículas abaixo de P80 (em t/h) na descarga e as alimentadas ao moinho, incluindo carga circulante (eficiência dinâmica).

E_c = idem, entre a descarga fina (*overflow*, no caso de um hidrociclone) do equipamento de classificação e sua alimentação incluindo a carga circulante (eficiência dinâmica).

Se demostró que la capacidad de producción en circuitos cerrados es casi constante para cargas circulantes del orden de 100 a 500%. Tal hecho muestra una cierta indiferencia del proceso dentro de este rango de operación (Yovanovic, set.1988), demostrando que la carga circulante es función apenas del error hidráulico de la partición de pulpa en el clasificador. La eficiencia total del sistema puede ser levemente mejorada al reducirse la carga circulante a valores próximos a los definidos por la Ecuación 1.21, permitiendo, además, reducir significativamente los costos de inversión y operación (Orwe D. e Noreen D., 1988). Apenas la bomba centrífuga que alimenta el equipo de clasificación, para altos niveles de carga circulante, consume más de 1,5 kWh/t de mineral procesado por el molino (para una planta proyectada para procesar anualmente 9.000.000 de toneladas, por ejemplo, la economía es superior a US\$ 600.000,00/año). Por otro lado, la reducción de la carga circulante trae consigo un incremento en la densidad de la pulpa del overflow, reduciendo las necesidades de espesamiento, maximizando los tiempos de residencia en las operaciones unitarias posteriores y reduciendo el consumo y bombeo de agua dentro del proceso.

Demonstrou-se que a capacidade de produção em circuitos fechados é quase constante para cargas circulantes na faixa de 100 a 500%. Tal fato evidencia uma certa indiferença do processo dentro desta faixa de operação (Yovanovic, set.1988), demonstrando que a carga circulante é função apenas do erro hidráulico da partição de polpa no classificador. A eficiência total do sistema pode ser levemente melhorada ao se reduzir a carga circulante a valores próximos aos definidos pela Equação 1.25, permitindo, ainda, reduzir significativamente os custos de investimento e operação (Orwe D. e Noreen D., 1988). Só a bomba centrífuga que alimenta o equipamento de classificação, para altos níveis de carga circulante, consome mais de 1,5 kWh/t de minério processado pelo moinho (para uma usina projetada para processar anualmente 9.000.000 de toneladas, por exemplo, a economia é superior a US\$ 600.000,00/ano).



Por outro lado, a redução da carga circulante traz consigo um incremento na densidade da polpa do *overflow* do hidrociclone que fecha o circuito, reduzindo as necessidades de espessamento, maximizando os tempos de residência nas operações unitárias posteriores e reduzindo o consumo e bombeamento de água dentro do processo.

Na **abordagem energética**, diversas fórmulas empíricas têm sido desenvolvidas na tentativa de calcular a carga circulante ótima no processo de moagem, todas elas longe dos conceitos mencionados nas Equações 1.24 e 1.25.

Por outro lado, **na abordagem cinética**, **Austin** (1984) insiste na otimização do processo pela busca do valor $U=1$ (relação: minério/bola, em volume), tentando calcular teoricamente o nível de carga circulante que, incrementando o inventário total de partículas dentro do moinho, via *aumento do nível de polpa*, venha atingir aquela condição de carga. Esta abordagem, até agora, não apresenta nenhuma aplicação prática. Num trabalho posterior, de **Klimpel R.C.**, do próprio **Austin L.G.** e **Hogg R.** (1989), chega-se a conclusões diferentes e acaba contradizendo a teoria original de transporte de massa no estado estacionário. Neste último trabalho, de 1989, é reconhecido que não é o nível de polpa dentro do moinho, incrementada pela carga circulante, que cria condições de aumento do inventário total de massa em relação aos corpos moedores (incrementando o valor de U), pois verificou experimentalmente que o nível de polpa permanece quase constante em moinhos *overflow*. Este aumento de inventário, como os próprios autores verificaram, é devido ao *aumento da densidade da polpa* dentro do moinho, fato que o **Modelo Operacional** considera. Isto cria também uma séria contradição com a teoria da distribuição constante do tempo de residência (*fully-mixed*), porquanto este aumento de densidade, na nossa opinião, só pode dever-se ao fenômeno de classificação hidráulica dentro do moinho.

A classificação hidráulica permite uma distribuição variável do tempo de residência, numa faixa que vai desde a própria água até as partículas mais duras e de maior tamanho. Experiências de laboratório, em batelada (**Gao M.W. e Forssberg E.**, 1989), fazem concluir a pesquisadores do modelo cinético, que a função seleção decresce rapidamente com o aumento do inventário de massa dentro do moinho ($U > 1$). O principal problema da abordagem utilizando o valor de U (Austin e outros) é o fato de considerar que toda a massa dentro do moinho está sujeita à cominuição, somando a massa da *zona de moagem*, que realmente está sendo cominuída, com a massa que está sendo apenas transportada.

MODELOS ENERGÉTICOS

$$W \text{ (ABERTO)} = 1,2 \times W \text{ (FECHADO)}$$

$$CC = \text{FIXA, } 300 \text{ a } 350\%$$

MODELOS CINÉTICOS

DESCONHECIDO

MODELO OPERACIONAL

- $CC = f(\text{Eficiência dos Equipamentos})$
 $= 100 (1-E) / E$
- $CC = 0$, para $E_m = 80\%$
- Equação de Continuidade
$$E = \frac{E_m \times E_c}{[1 - E_m (1 - E_c)]}$$
, para circuitos fechados

QUADRO RESUMO CLASSIFICAÇÃO EXTERNA



1.7 Modelo Operacional de Moagem

1.7.1 A Estrutura do Modelo Operacional

*El Modelo Operacional establece una analogía con los procesos químicos de transferencia de masa sugiriendo, inclusive, la creación de una nueva materia específica para introducir en el programa de estudios de los ingenieros químicos y de minas, la Transferencia Macromolecular de Masa, que propone estudiar diversos procesos de tratamiento de minerales en la perspectiva macromolecular (partículas, granos), mas de la forma como son estudiados los procesos moleculares de la ingeniería química, o sea: **Cómo las partículas actuarían si ellas fuesen moléculas?**. Conociendo esta condición, que normalmente hace tender los procesos hasta el equilibrio o, en la falta de este, indica el mejor camino para llegar al producto, el operador puede actuar sobre el circuito, induciendo el flujo másico bajo esta importante orientación, y por eso el modelo es llamado de operacional. El modelo no simula condiciones aleatorias de proceso, mas define su camino óptimo, o sea, es un modelo de optimización y no de simulación. El proceso de Concentración de Masa por Flotación fue integralmente desarrollado bajo esta óptica, en analogía con el proceso de absorción gaseosa (Yovanovic, 2004).*

O **Modelo Operacional** estabelece uma analogia com os processos químicos de transferência de massa sugerindo, inclusive, a criação de uma nova matéria específica para introduzir no programa de estudos dos engenheiros químicos e de minas, a *Transferência Macromolecular de Massa*, que propõe estudar diversos processos de tratamento de minérios na perspectiva macromolecular (partículas, grãos), porém da forma como são estudados os processos moleculares da engenharia química, ou seja: **Como as partículas agiriam se elas fossem moléculas?**. Conhecendo esta condição, que normalmente faz tender os processos até o equilíbrio ou, na falta dele, indica o melhor caminho para chegar ao produto, o *operador* pode atuar sobre o circuito, induzindo o fluxo mássico acima desta importante orientação, e por isso o modelo é chamado de *operacional*. O modelo não simula condições aleatórias de processo, mas define o caminho ótimo dele, ou seja, é um **modelo de otimização e não de simulação**. O processo de Concentração de Massa por Flotação foi integralmente desenvolvido sob esta ótica, em analogia com a absorção gasosa (Yovanovic, 2004).

Estabelecendo a **analogia** com os processos moleculares, neste caso da cominuição: a *destilação fracionada*, o modelo passa, numa segunda fase, a identificar o **fenômeno real** que deve ser estudado e extrapolado para as operações industriais de moagem, que consiste numa combinação entre a *cominuição*, que é o fenômeno fundamental, a *classificação interna* (conceito introduzido por esta abordagem), a *aplicação de energia*, a *função transporte em estado estacionário* e a *operação*, que pode induzir o processo sob a combinação ótima de todos os fatores anteriores. O terceiro passo é definir a **propriedade macrofenomenológica** do modelo, que para este caso é o *Índice de Cominuição*, definido na equação 1.23.

1.7.2 Princípios do Modelo Operacional de Cominuição

Ao longo do texto serão aplicados diversos conceitos introduzidos pelo Modelo, alguns deles são resumidos a seguir, para uma melhor compreensão do Leitor:

Primeiro Princípio: Frente a uma determinada tensão os *materiais homogêneos quebram*, em diversos fragmentos, de acordo com uma determinada propagação de esforço no interior das partículas, possível de simular e estudar em nível de laboratório.



Nos *materiais heterogêneos*, como é a grande maioria dos minérios, a energia aplicada permite desagregar a ganga que dissolve os grãos das substâncias que desejamos liberar, e os fragmentos produzidos são diferentes entre si e do fragmento original, tanto em dureza, no grau de liberação dos seus grãos e na sua composição química.

A partícula gerada de uma partícula heterogênea é uma nova partícula diferente.

Segundo Princípio: A forma como a energia mecânica aplicada ao equipamento é transferida para o material é de forma *massiva*, mediante inúmeros contatos (corpos moedores / rocha).

Energia Mecânica Aplicada → contatos massivos bola/minério

Terceiro Princípio: Uma determinada quantidade/qualidade de contatos massivos entre corpos moedores e minério, por unidade de força, permite que o material seja cominuído até um valor definido. Poucos contatos, mas de grande força, podem eventualmente equivaler a muitos contatos de menor intensidade. Esta **intensidade massiva de contatos é constante** para a massa se transferir de $F \rightarrow P$, e se trata de uma necessidade energética específica de cada material para atingir um determinado objetivo.

Quarto Princípio: O conjunto de contatos bola/minério depende de diversos fatores, como as dimensões do equipamento (D, L), a velocidade de rotação, o nível de enchimento, etc. Existe, para cada equipamento e condições de processo, uma **combinação ótima** entre estes fatores que proporcionam a mesma quantidade/qualidade de contatos bola/minério ao mínimo custo energético possível.

1.7.3 Leis do Modelo Operacional

As seguintes Leis matemáticas, introduzidas pelo modelo, são absolutamente análogas às utilizadas no processo de flotação (Yovanovic, 2004):

- **Primeira Lei:** Define o fenômeno fundamental, ou propriedade macro-fenomenológica e o seu scale-up para a operação contínua industrial. É o caso do *Índice de Cominuição (IC)* no processo de moagem.

$$IC = (BL / TM) \times TZ \times DI \times RM \times FG, \text{ (Potência - hora)/t}$$

O Índice de Cominuição leva implícita a relação entre a aplicação mecânica de energia e o mecanismo da cominuição seletiva (atingir Φ ao máximo P80 e ao mínimo consumo energético possível).

$$E, \Phi = f(IC)$$

A partir do laboratório, em testes piloto ou, inclusive, a partir de testes comparativos com operações industriais, é possível determinar o Índice Base de Cominuição (**IB**), o qual é diretamente extrapolado para o projeto industrial desejado, para F80 e P80 constantes:

$$IB = IC, \text{ Primeira Lei} \quad (1.29)$$



- **Segunda Lei:** Expressão matemática que descreve o processo em estado estacionário, chamada de **Equação de Continuidade**. Esta equação ⁽¹⁾ é utilizada para interpretar o processo completo do circuito fechado, estabelecendo uma expressão que relacione a performance do moinho e também do classificador externo, normalmente hidrociclone.

Equação de Continuidade:

$$E = \frac{E_m \times E_c}{[1 - E_m (1 - E_c)]}, \text{ equação 1.28}$$

- **Terceira Lei:** Equação matemática que expressa a condição ótima para o processo. Chamada de **Equação de Otimização** e que orienta a operação para trabalhar sobre o Ponto Ótimo do sistema.

Na verdade, pelo fato de considerar a aplicação de energia como parte do processo, foi necessário estabelecer uma *série de equações* que relacionam as características da alimentação e do produto, da energia específica, do transporte em estado estacionário e as variáveis que otimizam a classificação interna.

Foram desenvolvidos, em conjunto com a empresa **Solution - Engenharia de Automação Ltda.**, de Belo Horizonte os programas **OPERAMILL.PR**, para o projeto de novas instalações e **OPERAMILL.OPT**, para a otimização operacional de instalações existentes, este último com base para a implantação de sistemas de controle otimizante. Além de inúmeras variáveis e equações consideradas nos cálculos, foi criada uma rotina de operação virtual de moinhos, incluindo 14 variáveis:

DO PROCESSO

01. Umidade do minério alimentado.
02. Tamanho da alimentação (**F80**).
03. Tamanho do produto (**P80**).
04. Peso específico médio do material.
05. Peso específico do componente mais duro e pesado.
06. Valor estimado de dureza (O programa recalcula e ajusta este valor).

CONDIÇÕES MECÂNICAS

07. Dados básicos relativos ao equipamento.

DA OPERAÇÃO

08. Porcentagem da velocidade crítica.
09. Tipo de corpo moedor (volume aparente, consumo específico e peso específico do material).
10. Diâmetro (tamanho) do corpo de reposição.
11. Nível estimado de Enchimento (o programa o recalcula e ajusta).
12. Porcentagem de sólidos na moagem.
13. Porcentagem de carga circulante.
14. Porcentagem de sólidos na polpa bombeada.

A **Figura 1.7.1** ilustra a estrutura do modelo.

(1) Para o processo de flotação em etapas, na recuperação composta de duas etapas de flotação interconectadas em série (R), o modelo desenvolveu uma equação que expressa este valor em função da recuperação individual de cada etapa (R_1 e R_2) da mesma forma que a equação 1.28:

$$R = (R_1 \times R_2) / [1 - R_1(1-R_2)]$$



Figura 1.7.1 – A Estrutura do Modelo Operacional

A moagem em circuito fechado, diferentemente dos modelos convencionais, é analisada com maior transparência e sentido prático, mediante a aplicação da 2ª lei. Por outro lado, a moagem em circuito aberto pode ser uma boa alternativa quando são considerados aspectos de investimento e custos de operação do sistema em geral. Em circuitos fechados, a redução da carga circulante, além de promover uma maior eficiência energética, contribui para reduzir a diluição da polpa no *overflow* do classificador, melhorar as condições reológicas da polpa, reduzir as necessidades de bombeamento, etc.

1.7.4 Resumo Fenomenológico

Na Figura 1.1.2 foi ilustrado um resumo dos conceitos anteriores, e esta ilustração será muito utilizada ao longo do texto. No eixo horizontal, o material R (rocha) entra ao processo com tamanho F80 e liberação Φ_0 , transferindo-se para uma condição de Produto, onde possui um tamanho P80 e liberação Φ . Para perfazer este caminho, o material entra ao equipamento e é submetido às regras do jogo deste médio, na energia aplicada massivamente pelos contatos bola/minério; aos aspectos operacionais que mudam a combinação entre estes contatos (variáveis mecânicas, densidade da polpa, etc); às características do transporte de retirada de produto e à classificação interna que fomenta a seletividade do processo. Pelo lado vertical, a energia entra ao equipamento (detalhes no **Capítulo 3**) de forma eletromecânica, aceita algumas variações em termos de otimização desta aplicação (diâmetro, velocidade, revestimentos, tipo de corpo moedor, enchimento, etc.), que constitui um interessante campo de otimização.

Os modelos energéticos lidam muito bem com a aplicação mecânica da energia, que conduz a dimensionamentos bastante aproximados, em termos de potencia *Gross* aplicada, mas são muito limitados na compreensão do transito do material no eixo horizontal da figura. Os modelos cinéticos, pelo contrário, enfrenta com maior detalhe o caminho da redução do tamanho e da energia líquida - teórica possível de utilizar, com pouco aprofundamento nas considerações energéticas envolvidas no plano macroscópico. O **Modelo Operacional** pretende lidar simultaneamente com os fluxos de massa e de energia, de forma macroscópica, de acordo aos conceitos indicados na Figura 1.7.2.

Na Equação 1.10 tinha-se observado que, para manter constante a taxa de produção, as expressões que definem a transferência de massa, tanto da fase rocha como da fase polpa têm que ser iguais. Na rocha acontece a cominuição e na polpa o transporte do produto, tudo isso dentro do moinho.



$$N_x = t/h = \underset{\text{ROCHA}}{K \times A \times \Delta E} = \underset{\text{POLPA}}{K_t \times A_t \times (\Phi - \Phi_0)}, \text{ Equação 1.10}$$

Na **Tabela 1.7.1** são resumidas as variáveis mais importantes que definem a transferência de massa por cominuição. O objetivo otimizado do processo é maximizar N_x para o mínimo consumo de energia (ΔE), para um determinado Φ .

Tabela 1.7.1 – Variáveis que Afetam a transferência de Massa

ROCHA	POLPA
COMINUIÇÃO = $K \times A \times \Delta E$	TRANSPORTE = $K_t \times A_t \times (\Phi - \Phi_0)$
<u>COEFICIENTE DE COMINUIÇÃO (K)</u> Tempo de Moagem (TZ) Fator de Golpe FG (Frequência de contato) Velocidade Crítica (VC)	<u>COEFICIENTE DE TRANSPORTE</u> Fluxo mássico por unidade de tempo (t) = Q
<u>ÁREA DE CONTATO BOLA/MINÉRIO</u> Nível otimizado de enchimento igual ao volume da zona de moagem: JA/VZ = 1	<u>ÁREA DE INTERFASE ROCHA/POLPA</u> Área superficial da carga = f (L/D)
<u>GRADIENTE DE ENERGIA</u> Diâmetro interno Tamanho do corpo moedor	<u>GRADIENTE DE TRANSPORTE</u> A partícula será transportada quando atinja uma determinada liberação, por tanto = f(SG, tamanho)

Os seis grupos de variáveis resumidos na Tabela 1.7.1 interagem entre si e a otimização do processo envolve a harmonização destes valores para conduzir aos objetivos descritos, de maximizar N_x ao mínimo consumo de energia.

Por exemplo, para manter a produção, um moinho de menor diâmetro (por tanto com maior relação L/D) significaria:

K: Aumenta o tempo TZ e a frequência do contato (Mais RPM para a mesma VC);

A: Pode ser mantido igual a 1

ΔE : Diminui o gradiente de energia (diferença entre a energia aplicada e a tensão de quebra da partícula)

K_t : Aumenta o tempo t, pelo aumento de volume interno.

A_t : Aumenta significativamente a área superficial (detalhes no item 3.4.2) favorecendo a seletividade da classificação interna.

$\Delta \Phi$: Pode ser mantido.

A Tabela 1.7.1 pode ser muito útil para ajudar a compreender as mudanças que poderiam acontecer no processo frente a diversas decisões, por exemplo: Mudar a % de sólidos da polpa, mudar o enchimento, velocidade, etc.

A propriedade macrofenomenológica introduzida pelo **Modelo Operacional**, o Índice de Cominuição, considera estas mesmas variáveis. Ao dividir a equação 1.10 pela taxa de produção TM:

$$\frac{K \times A \times \Delta E}{TM} = \frac{K_t \times A_t \times (\Phi - \Phi_0)}{TM} = \text{Constante}$$

$$IC = (BL / TM) \times TZ \times DI \times RM \times FG = \frac{K_t \times A_t \times (\Phi - \Phi_0)}{TM} = \text{Constante}$$



1.7.5 A Otimização do Processo

*La ecuación mecánica del proceso tiene como objetivo la busca de valores optimizados para las variables mecánicas involucradas, alcanzando el mínimo consumo específico de energía para producir el Índice de Cominuición requerido por el material. Existen muchas formas de alcanzar el valor deseado de IC, combinando de diferentes formas las variables que hacen parte de su determinación (velocidad, nivel de llenado, % de sólidos y otras); una de estas combinaciones es óptima y permite alcanzar el Índice de Cominuición que el mineral requiere al mínimo consumo específico de energía. Una parte importante del modelo fue comprobada a través de la resolución de sus rutinas de cálculo por medio de computador. Para esto, fueron introducidos los datos operacionales de algunos molinos industriales conocidos, comprobándose la validez y la precisión del modelo. En la **Figura 1.7.2** está resumida la metodología de cálculo del **Modelo Operacional** para diseño, simulación y optimización de molinos tubulares.*

A equação mecânica do processo objetiva a busca de valores otimizados para as variáveis mecânicas envolvidas, atingindo o mínimo consumo específico de energia para produzir o Índice de Cominuición requerido pelo material. Existem muitas formas de atingir o valor desejado de **IC**, combinando de diferentes formas as variáveis que fazem parte da sua determinação (velocidade, nível de enchimento, % de sólidos e outras); uma destas combinações é ótima e permite atingir o Índice de Cominuición que o minério requer ao mínimo consumo específico de energia. Uma parcela importante do modelo foi comprovada através da resolução de suas rotinas de cálculo por meio de computador. Para tanto, foram introduzidos os dados operacionais de alguns moinhos industriais conhecidos, comprovando-se a validade e a precisão do modelo. Na **Figura 1.7.2** está resumida a metodologia de cálculo do **Modelo Operacional** para dimensionamento, simulação e otimização de moinhos tubulares.

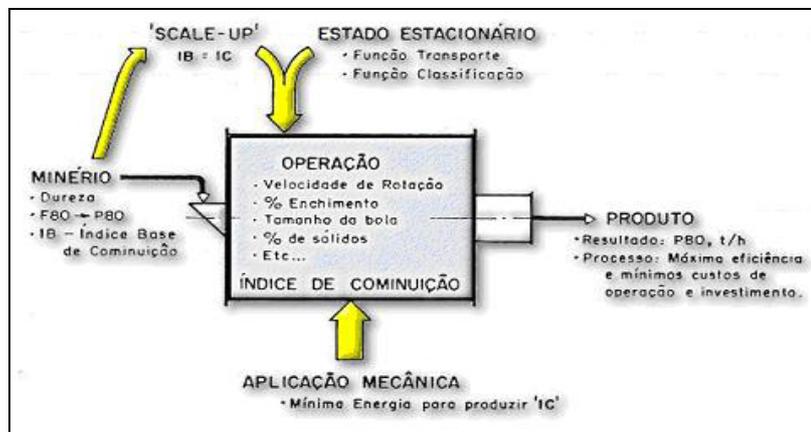


Figura 1.7.2 – Esquema de Aplicação do Modelo Operacional de Moagem

O Programa **OPERAMILL** foi utilizado para avaliar a moagem de 9 milhões de toneladas/ano para um projeto de sulfetos de Cobre (Yovanovic e Moura, 1991). Os resultados da simulação são apresentados na **Tabela 1.7.2**. As avaliações não levaram em conta a maior seletividade do sistema aberto otimizado, de modo que ambas alternativas foram avaliadas para o mesmo P80 no produto. Lembremos que a liberação obtida em circuito aberto é bem maior, de modo que para uma avaliação mais real, considerando um produto com a mesma liberação (Φ), as vantagens do circuito otimizado seriam bastante maiores; para começar, não precisaria de 1 moinho a mais.



Princípios do MODELO OPERACIONAL Para a Otimização do Processo de Moagem

Operar, sempre que possível, em **circuito aberto**.

Existe um **nível ótimo de enchimento de corpos moedores**, próprio para cada caso, que normalmente varia entre 20 e 30%, como observado nas nossas rotinas de cálculo e confirmado em algumas operações industriais. O nível máximo de enchimento (acima de 40%) conduz geralmente a grandes ineficiências para o processo (maior consumo específico de energia, de revestimentos e de corpos moedores).

A empresa Kirkenes (Noruega), que mói taconita, atingiu o valor ótimo de enchimento em 22%; por outro lado, a usina de cobre de Tennessee (USA), atingiu o ótimo em 29%, ainda com 5% de maior capacidade quando comparado à sua operação anterior com 45% de enchimento. Ambas usinas operando em circuito aberto de moagem.

Existe uma **velocidade de rotação ótima** para cada diâmetro de moinho.

Existe uma **faixa ótima de diâmetro de moinho** para cada situação de processo estudada. A partir de certo valor, a energia aplicada é parcialmente desperdiçada.

Os moinhos convencionais são mais eficientes que os semi-autógenos. As avaliações técnicas utilizadas para comparar ambos os sistemas são normalmente tendenciosas em favor das tecnologias importadas (Yovanovic e Moura, 1992).

No caso de operar em circuito fechado, existe uma % de **carga circulante mínima - necessária**, possível de calcular e definir.

Os mecanismos principais envolvidos no processo de moagem (cominuição, transporte macromolecular e classificação hidráulica) dependem diretamente da **viscosidade da polpa** dentro do moinho.

Tabela 1.7.2 – Avaliação de Alternativas de Moagem (Yovanovic e Moura, 1991)

ITEM	CONVENCIONAL	OTIMIZADO
Nº de Moinhos	6	7
Dimensões	16,5 x 31,7 pés	16,5 x 31,3 pés
Consumo Específico kWh/t, <i>net</i>	16,85	14,91
Potência Aplicada por Moinho, HP	4.875	3.700
Potência Total Aplicada, HP	29.250	25.900
Nível de Enchimento, %	40,0	22,0
Carga Circulante, %	350	-
Investimento Total, US\$ Miles	38.098	37.298
Custo de Operação, US\$/t	1,97	1,60

De acordo com tabela, a opção pela moagem seletiva significaria uma economia de quase US\$ 3,3 milhões/ano para o projeto. Considerando a maior seletividade da condição otimizada, a diferença entre as alternativas poderia subir ainda mais.



1.7.6 Critérios de Avaliação e Aplicações

Os objetivos metalúrgicos de um processo de cominuição são a *Liberação* da substância de interesse (Φ) e o *Tamanho do Produto* (**P80**), ao mínimo custo possível.

Liberação

O grau de liberação da partícula do nosso interesse deve ser avaliada por faixa granulométrica, de acordo com o **Índice de Liberação** (Φ). As faixas granulométricas consideradas não devem ser muito numerosas, para reduzir o tempo e o custo dos trabalhos experimentais. É efetuado, ao microscópio, um estudo de contagem de grãos sobre seções polidas, para cada faixa granulométrica considerada. Para o caso da *flotação* de muitas espécies, por exemplo, partículas acima de 200 μm ou menores que 5 μm são difíceis de flotar, de modo que a avaliação de placas polidas no microscópio é feita preferencialmente entre estas faixas ($200 > M > 5$). É de esperar-se uma maior liberação das partículas finas com respeito ao valor base da faixa **M** e, pelo contrário, uma menor liberação nas partículas mais grosseiras, de modo que não é importante conhecer exatamente os graus de liberação destas faixas.

$\Phi = (\text{Peso da substância livre} / \text{Peso total de substância})$, para cada faixa

O grau de liberação (Φ) corresponde então à proporção de grãos de substância e de ganga dentro das partículas mistas. O objetivo da moagem é definido com base numa determinada liberação dos grãos do nosso interesse, considerada aceitável para a operação de separação que se segue, e que normalmente corresponde a 80% de proporção de grãos liberados dentro de uma partícula mista ($\Phi = 0,8$).

A eficiência obtida na liberação da substância **A**, de nosso interesse, no produto da moagem, depende diretamente da aplicação de energia, da forma:

$$\text{Energia} = f(\Phi / \Phi_0) \quad , \text{Equação 1.6}$$

Como veremos, na moagem seletiva de rochas heterogêneas a liberação das partículas pode ser obtida moendo o material de diferentes formas, onde normalmente será utilizado o menor consumo específico de energia quando o valor de Φ seja obtido com o máximo tamanho possível no produto (**P80**). O **Modelo Operacional** estabelece que, nas operações de moagem, o produto não deve ser apenas avaliado como uma questão de **tamanho**, mas de **liberação** da substância do nosso interesse.

Tamanho

Para processos convencionais de moagem é adotado como critério de medida a avaliação da malha onde 80% das partículas são passantes (**F80** – Alimentação e **P80** - Produto). Em processos de moagem muito fina é considerada a medida da **superfície específica** obtida no produto (a moagem de alguns materiais industriais, de cimento e de finos de minério de ferro para pelotização, são alguns exemplos). A britagem de material de construção é também um processo de cominuição que não persegue um processo posterior de separação com concentração de massa. Uns dos maiores problemas atuais no estudo e modelagem das operações de moagem é que os trabalhos de pesquisa e de projeto utilizam quase que unicamente a concepção homogênea do fenômeno, inclusive para processos de moagem seletiva com separação e concentração posterior de massa, onde a medida do **P80** no produto não reflete exatamente o grau de liberação necessário das substâncias.



Seletividade

A seletividade da cominuição é definida como um fator de separação entre as partículas mineralizadas do nosso interesse e a ganga (e outras partículas que não são do nosso interesse), e essa seletividade pode ser modificada mediante a ação de diversas variáveis. Para uma condição definida, a seletividade é explicada mediante dois mecanismos principais: a preferência pela liberação de partículas do nosso interesse, na fase rocha (*seletividade na quebra*), e pelo gradiente de concentração que é produzido na camada de polpa que contém os fragmentos produzidos (*seletividade na polpa*).

O Modelo Operacional propõe a utilização da **Curva de Seletividade** como elemento macroscópico para o estudo deste mecanismo, o qual pode ser observado em função da aplicação de energia (**E** vs. Φ) ou da redução de tamanho (**P80** vs. Φ). Para o caso de materiais homogêneos ou quando a cominuição não tenha objetivos de separação com concentração, este mecanismo não precisa ser levado em conta nos procedimentos experimentais.

Fator de Separação

Este fator é utilizado nas operações de destilação, para verificar a seletividade da substância de interesse na fase vapor (y^*), em comparação com a sua concentração na fase líquida (x). Para as operações de cominuição podemos expressar a concentração em função do grau de liberação dos grãos da substância do nosso interesse, de modo que o fator de separação pode-se definir da seguinte forma:

$$S = \frac{\Phi (1 - \Phi_0)}{\Phi_0 (1 - \Phi)} \quad (1.30)$$

Onde,

Φ = Grau de liberação observado no produto (fase polpa), da substância de interesse;

Φ_0 = Grau de liberação no fluxo alimentado (fase rocha) ao processo de cominuição.

Para minérios homogêneos, o valor de S é igual à unidade. Para minérios heterogêneos, beneficiados por cominuição seletiva, o valor do fator de separação deve ser o maior possível.

* Texto extraído do Livro: **Engenharia da Cominuição e Moagem em Moinhos Tubulares**, de autoria de Alexis Yovanovic, Belo Horizonte, Maio 2005.

Maiores detalhes solicitar ao Autor.



Alexis P. Yovanovic
MODELO OPERACIONAL
Otimização e Controle de Processos Minerai
Tel.: (31) 3221-7667 Belo Horizonte / MG. Brasil.
E-mail: ayovanovic@uai.com.br