

75

CETEM

Série Tecnologia Mineral

**Moagens Fina e
Ultrafina de Minerais
Industriais:
uma revisão**

Franz-Josef Wellenkamp

PRESIDENTE DA REPÚBLICA: Fernando Henrique Cardoso
VICE-PRESIDENTE DA REPÚBLICA: Marco Antonio Maciel
MINISTRO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA: Ronaldo Mota Sardenberg
SECRETÁRIO EXECUTIVO: Carlos Américo Pacheco
SECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO DAS UNIDADES DE PESQUISA:
João Evangelista Steiner

CETEM - CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

DIRETOR: Fernando A. Freitas Lins

COORD. DE PROJETOS ESPECIAIS (CPE): Juliano Peres Barbosa

COORD. DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS (CTM): Adão Benvindo da Luz

COORD. DE METALURGIA EXTRATIVA (CME): Ronaldo Luiz C. dos Santos

COORD. DE QUÍMICA ANALÍTICA (CQA): Maria Alice C. de Góes

COORD. DE ESTUDOS E DESENVOL. (CES): Carlos César Peiter

COORD. DE ADMINISTRAÇÃO (CAD): Cosme Regly

Franz-Josef Wellenkamp

*Engenheiro de Minas, Dr. Ing., Bolsista do CNPq,
CETEM. Especialista em processamento de
partículas finas e ultrafinas.*

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

CONSELHO EDITORIAL

Editor

Fernando Freitas Lins

Conselheiros Internos

Adão Benvindo da Luz, João Alves Sampaio, Juliano Peres Barbosa,
Luiz Gonzaga Sobral, Paulo Sérgio Moreira Soares, Roberto C. Villas
Bôas, Vicente Paulo de Souza

Conselheiros Externos

Antonio E. Clark Peres (UFMG), Henrique Kahn (USP), João Batista Bruno
(NATRONTEC), José Aury de Aquino (CDTN/CNEN), José Farias de Oliveira
(COPPE/UFRJ), Luiz Alberto Cesar Teixeira (PUC-RJ), Virgínia Sampaio
Ciminelli (UFMG)

A **Série Tecnologia Mineral** publica trabalhos na área minero-metalúrgica. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes dos projetos desenvolvidos no CETEM.

Jackson de Figueiredo Neto COORDENAÇÃO EDITORIAL

Vera Lúcia Ribeiro EDITORAÇÃO ELETRÔNICA

Indexado no *Chemical Abstracts* e no *IMM Abstracts*.

Wellenkamp, Franz-Josef

Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão/Franz-Josef Wellenkamp. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1999.

56p. - (Série Tecnologia Mineral, 75)

1. Minerais Industriais. 2. Moagem (beneficiamento de minério). I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Título. III. Série.

ISBN 85-7227-122-8

ISSN 0103-7382

CDD 553.6

APRESENTAÇÃO

A moagem fina e ultrafina de minerais, particularmente de minerais industriais, para os quais o desempenho em suas múltiplas aplicações são freqüentemente dependentes, entre outras características, da granulometria, é uma área de grande interesse e em constante desenvolvimento.

O presente trabalho de revisão realizado pelo Dr. Franz-Josef Wellenkamp, bolsista do CNPq e desenvolvendo suas atividades de pesquisa no CETEM, certamente será valioso para os leitores interessados no tema.

Rio de Janeiro, dezembro de 1999.

Fernando Antônio Freitas Lins
Diretor

SUMÁRIO

RESUMO/ABSTRACT	1
1. INTRODUÇÃO	3
2. FUNDAMENTOS DA COMINUIÇÃO	4
3. TÉCNICAS DA MOAGEM FINA E ULTRAFINA	10
3.1 Moinhos com Meio Moedor	12
3.2 Moinhos de Choque	24
3.3 Moinhos de Rolos	38
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
AGRADECIMENTOS	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
EXTENDED ABSTRACT.....	53

RESUMO

Este trabalho faz uma revisão das técnicas de moagem fina e ultrafina, abordando os conhecimentos atuais dos processos de fragmentação de partículas e os tipos de moinho utilizados em escala de laboratório e industrial. As informações mais importantes sobre o princípio de funcionamento dos moinhos, requisitos dos materiais de alimentação e granulometria dos produtos gerados são apresentadas.

Palavras-chave: moagem fina, moagem ultrafina, tipos de moinho

ABSTRACT

This work reviews the fundamentals of particle fragmentation and the techniques used for fine and ultrafine grinding of mineral resources for applications in various industrial sectors. The most important representants of media, impact and roller mills are presented, as well as informations about feed material requirements and product size distributions are given.

Key words: fine grinding, ultrafine grinding, mill types

1. INTRODUÇÃO

A moagem fina (<100 μm) é uma das mais importantes operações na indústria mineral, se caracteriza por altos consumos de energia elétrica. Por esta razão, muito trabalho de pesquisa foi realizado nas ultimas décadas visando a redução do consumo de energia da moagem. Como co-produto desses esforços, os fundamentos da fragmentação foram esclarecidos, conduzindo a uma melhor compreensão dos processos da fratura de partículas. Na base desses conhecimentos, progressos significativos na prática de moagem foram obtidos. A otimização dos moinhos de bolas, vibratórios e de impacto foi possível e novos tipos de moinhos foram inventados. Uma outra meta de pesquisa foi a extensão dos limites de moagem no sentido de tamanhos menores de partículas até a faixa submicrométrica e o processamento de materiais ultrafinos (<10 μm). Esses materiais ultrafinos são usados em várias indústrias, tais como indústria de papel, química, tinta, plástica ou cerâmica. Devido aos custos relativamente baixos da moagem ultrafina, em comparação com o processamento químico dos produtos concorrentes, produtos ultrafinos gerados via moagem estão substituindo os produtos químicos.

Embora as técnicas avançadas das moagens fina e ultrafina já sejam aplicadas industrialmente no beneficiamento de minerais industriais, ainda há pouca divulgação sobre as mesmas no Brasil. Com o presente trabalho, esperamos contribuir para uma divulgação mais ampla sobre as possibilidades e os limites da moagem, apontando usos potenciais nas indústrias do País. O presente trabalho inicia-se com uma abordagem dos fundamentos da cominuição e uma apresentação do estado da arte da moagem fina e ultrafina, ilustrada com exemplos práticos.

2. FUNDAMENTOS DA COMINUIÇÃO

A cominuição pode ser entendida como a fragmentação de uma estrutura sólida quando submetida a forças mecânicas. Nesse contexto, necessita-se de energia para vencer as forças de ligação interatômica. As forças mecânicas são aplicadas nas partículas através dos elementos do moinho ou do meio moedor, provocando a deformação das partículas. As deformações provocam a geração de tensões internas, já que deformações e tensões estão ligadas por leis mecânicas da matéria. As deformações podem ser caracterizadas como elástica, plástica e viscosa, ou compostas, para a maioria dos materiais. Por exemplo, em plásticos as deformações são denominadas de visco-elásticas, e em aços, elástico-plásticas[1].

O processo elementar para redução de tamanho de partículas é a quebra, que tem como resultado a formação de fragmentos de diferentes tamanhos e de forma irregular. A quebra é provocada por elevações de tensões em falhas da estrutura cristalina. A partícula quebra quando as elevações de tensões nas extremidades das falhas atingem um nível crítico, iniciando-se a sua propagação não-estável. Os processos de quebra podem ser explicados, teoricamente, por conceitos da mecânica de quebra ou fluxo linear-elástica[2].

Esses conceitos explicam que deformações elásticas em materiais quebradiços, como cerâmicas, podem provocar a quebra, mesmo que as falhas sejam pequenas. Isso não acontece para materiais onde predomina a deformação visco-elástica. Nestes casos as elevações de tensão, parcialmente, são dissipadas, e as falhas devem ser maiores para que ocorra a quebra.

De acordo com Griffith, uma fenda espalha-se rapidamente se a energia elástica de deformação disponível é maior que a energia específica livre da superfície. No entanto, análises de

resistência de materiais cerâmicos policristalinos muito quebradiços mostram que a energia de deformação liberada durante a quebra é, apenas parcialmente, transformada em superfície nova [3]. A maior parte da energia usada em outros processos são inerentes à ruptura, tais como:

- deformações plásticas não homogêneas;
- dispersão de energia em microfendas, contatos entre grãos ou não-homogeneidades;
- elevações da temperatura nas extremidades da fenda.

Considerando essas perdas, no balanço de energia deve constar ao invés da entalpia da superfície gerada um outro termo - a resistência da área quebrada, que contém essas perdas. Por isso, a nova formulação do balanço de energia ocorre segundo a Equação 1, onde a igualdade entre a taxa de energia liberada G_c e a resistência da área quebrada R_o é o critério para a quebra[4, 5].

$$G_c = R_o \quad [1]$$

onde:

- G_c taxa crítica de liberação de energia;
- R_o resistência à quebra no início da ruptura.

A energia elástica liberada durante o espalhamento das fendas tem origem na:

- energia elástica liberada do campo de tensão da partícula;
- energia elástica fornecida por elementos do moinho;
- energia elástica oriunda de tensões térmicas, e
- energia oriunda de reações químicas e absorções.

A temperatura na extremidade da fenda durante a quebra, determinada por espectrografia, atinge os valores de 4000 K,

3000 K e 1300 K, respectivamente, em partículas de quartzo, vidro e de calcário. A parcela de energia elástica fornecida por elementos do moinho em consequência dos processos de reações químicas e absorção é considerada bastante pequena, devido à grande velocidade de propagação das fendas (aço de 1900 m/s; vidro 1000 m/s)[6].

A área da superfície nova, criada após a quebra, não está em equilíbrio, mas ativa química e fisicamente, devido às falhas, transposições e partes amorfas no sistema cristalino. Devido à entalpia interna elevada, observa-se, em minerais recém-moídos, maior potencial de absorção de gás e maior solubilidade, como acontece com a columbita e o pentóxido de vanádio[7, 8, 9].

Em testes de resistência, observa-se que as tensões de quebra aumentam com a redução do tamanho das partículas. Weibull interpretou esse fenômeno estatisticamente e concluiu que, em volumes maiores, a probabilidade da existência de falhas é maior. Os padrões de falha variam com a natureza do material. Com isso, o modelo de Weibull, apenas estatístico, não descreve a relação entre a resistência e o tamanho das partículas, independentemente do material[10].

Outra explicação para a razão do aumento da resistência em faixas granulométricas finas é o fato da quebra de uma partícula consumir maior quantidade da energia elástica, estocada no campo de tensão, do que numa partícula grossa. Isso também explica a razão pela qual na moagem ultrafina são exigidos esforços repetitivos[11].

Uma dificuldade na moagem ultrafina é a ocorrência do fenômeno, chamado transição quebradiça plástica, na faixa granulométrica de 1-3 μm . Abaixo dessa granulometria, os materiais apresentam deformação inelástica, quando são submetidos a esforços. A quebra de materiais que apresentam plasticidade é mais difícil, e, até hoje, os processos de cominuição em granulometrias abaixo do limite da transição quebradiça plástica não são compreendidos. Embora, do ponto

de vista físico, não exista um limite teórico de cominuição, esse é encontrado na prática. Duas razões estão ligadas a esse fato: i) nos sistemas de moagem não existe um esforço adequado na faixa submicrométrica; ii) nas faixas submicrométricas normalmente ocorre o equilíbrio de cominuição, seguido de agregação[12, 13].

Em ensaios de cominuição de partículas isoladas, foram estudadas as relações entre o tipo de esforço, resultado de cominuição e aplicação de energia. Esses ensaios mostraram que a utilização de energia é elevada, quando a quebra for provocada por forças de pressão. As forças de arraste na cominuição de alguns materiais, como clínquer, facilitam a quebra; em outros, como calcário, não foi encontrada essa influência. Um efeito positivo das forças de arraste na moagem fina pode ser a dispersão dos detritos, o que melhora as condições da cominuição[14].

Os esforços de impacto ou choque caracterizam-se pela geração súbita das tensões nas partículas. Maior velocidade de esforço auxilia a iniciação da quebra. Contudo, a utilização de energia não é muito elevada e atinge menos que 50% da utilização de energia dos esforços por pressão. As maiores perdas de energia devem-se à energia cinética e rotativa residuais nos fragmentos[15].

Nos ensaios de cominuição, onde as partículas são postas em camadas, muitas delas são submetidas aos esforços concomitantemente. Observou-se que, em camadas, constituídas de partículas de vários tamanhos, a quebra de uma fração granulométrica influencia a quebra das outras. Observou-se também que a taxa de quebra das partículas maiores decresce na presença das finas, e vice-versa. Por isso, nesse tipo de cominuição, a alimentação deve apresentar faixas granulométricas estreitas. A aplicação de forças de arraste às camadas não deve ter um efeito positivo sobre a utilização de energia, por causar perdas de energia[16, 17].

A função principal de um moinho é a aplicação de forças mecânicas ao material, provocando a quebra das partículas. Para isso, as partículas são submetidas a um dos esforços ou a uma combinação, conforme mostrado na Figura 1.

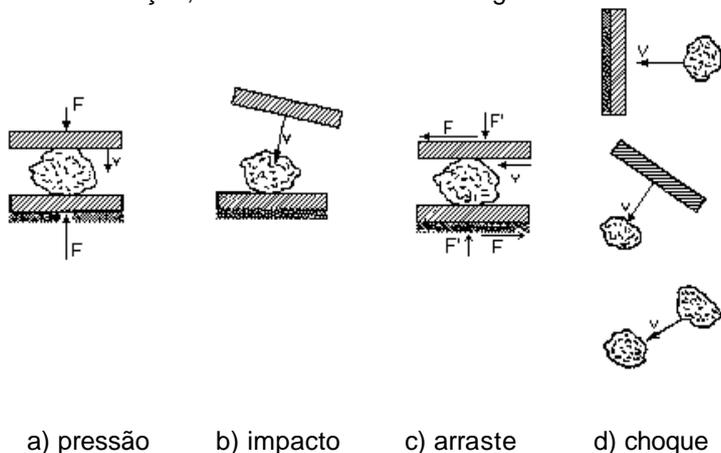


Figura 1 - Detalhes de esforço entre dois planos

Dentre esses esforços, os de pressão, arraste e impacto são caracterizados pela posição das partículas entre dois planos de trabalho, ao contrário do esforço por choque, que ocorre num único plano. No esforço de pressão, as partículas situadas entre os planos são comprimidas com velocidade relativamente baixa. Como resultado obtém-se fragmentos pontiagudos (a). No esforço de arraste, as forças de pressão são forças superpostas em sentido paralelo aos planos. Devido a maior intensidade de abrasão nas extremidades, as partículas tornam-se arredondadas (c). Já no esforço de impacto, as partículas são comprimidas com velocidade maior. No esforço por choque, a partícula colide com o plano ou outras partículas. Na colisão, a energia necessária para a ruptura é liberada, a qual é oriunda da energia cinética das partículas antes do choque (d).

O transporte interno do material é uma característica muito importante nos moinhos, já que apenas numa determinada área

dos mesmos (chamadas zonas ativas de moagem) a cominuição ocorre. O transporte de partículas às zonas ativas torna-se mais difícil com o descréscimo da granulometria. Por isso, os equipamentos utilizados nas moagens fina e ultrafina devem ser otimizados em termos fluidodinâmicos e ser adequados para operação com altas velocidades.[18]

Os aditivos de moagem e o ambiente (seco ou úmido) favorecem a moagem através da redução das forças de adesão entre as partículas, por evitarem a formação de agregações e aderências de material. Na opinião de alguns pesquisadores, o efeito positivo dos aditivos deve contribuir para as reações do estado sólido[19, 20].

Na moagem a úmido, a tendência à agregação é menor que na moagem a seco. As partículas suspensas se agregam quando a sua concentração volumétrica é elevada e as distâncias entre as partículas estão abaixo de um certo valor. Visando prevenir a agregação, utilizam-se tratamentos específicos, como recursos do carregamento eletrostático que permitem a estabilização na fase aquosa. As técnicas físico-químicas têm como objetivo controlar as propriedades de superfície das partículas, visando a obtenção de produtos que podem ser, facilmente, dispersos[21, 22].

A moagem prolongada promove a modificação ou reformulação (planejada) da estrutura cristalina dos materiais, para fins de produção de materiais avançados. Esses processos podem ser acompanhados por várias reações mecanoquímicas secundárias[23, 24].

3. TÉCNICAS DA MOAGEM FINA E ULTRAFINA

Nas operações de moagem fina, granulometria menor que 100 μm , e ultrafina, menor que 10 μm , são usados diferentes tipos de moinhos. Estes podem ser classificados de acordo com o mecanismo de fragmentação, que depende da resistência do material a ser processado ou do ambiente de moagem (seco/úmido).

Nos moinhos industriais, com exceção dos moinhos de faca, apenas os materiais quebradiços podem ser processados. Os materiais que apresentam plasticidade quando submetidos ao processo de deformação, em alguns casos, podem ser moídos se os recursos de secagem ou técnicas criogênicas são usados.

Na moagem de materiais resistentes e/ou abrasivos ocorre a contaminação do produto pela abrasão da carcaça ou do meio moedor. Para minimizar essa contaminação, são utilizados moinhos revestidos de materiais resistentes, tais como metais duros, carbetos de tungstênio, óxido de alumínio, carbetos de silício, dióxido de zircônio. Em alguns moinhos, a câmara de fragmentação é revestida com uma camada do próprio material; em outros, o meio moedor consiste do próprio material (*pebbles*). Em moagens onde há requisitos de pureza elevadas, os moinhos são revestidos com aços especiais e os contaminantes são removidos da polpa por lavagem ácida, numa etapa posterior do processo de moagem.

As moagens podem ser realizadas num ambiente úmido ou seco, dependendo do tipo de moinho e da destinação do produto final. Na moagem ultrafina, geralmente, a aplicação prevista dos produtos determina o ambiente. Assim, realiza-se a moagem em ambiente seco, quando a aplicação do material for em forma de pó, e em ambiente úmido, quando em forma de polpa.

Na Tabela 1 estão apresentados os tipos de moinhos usados nos processos de moagens fina e ultrafina. Além da indicação do tipo de esforço predominante, também são apresentadas informações sobre o limite mínimo de granulometria e o ambiente de operação.

Tabela 1 - Classificação dos moinhos quanto às moagens fina e ultrafina

Moinho Esforço	Pressão	Arraste	Impacto	Choque	Granulometria*	Ambiente
Moinhos com Meio Moedor						
a) moinhos cilíndricos		x	x		fina	seco/úmido
b) moinhos vibratórios		x	x		fina	seco/úmido
c) moinhos planetários	x	x			ultrafina	seco/úmido
d) moinhos de atrição		x			ultrafina	úmido
Moinhos de Choque						
1. Moinhos com rotor						
a) moinhos universais				x	fina	seco
b) moinhos de pinos				x	ultrafina	seco
c) moinhos de rotor				x	ultrafina	seco
2. Moinhos a jato						
a) oval				x	ultrafina	seco
b) espiral				x	ultrafina	seco
c) contra fluxo				x	ultrafina	seco
Moinhos de Rolos Verticais	x	x			fina	seco
Moinhos de R. de Alta Pressão	x				fina	seco

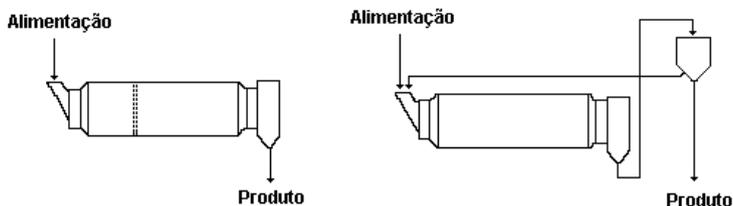
* granulometria fina <100 µm, ultrafina <10 µm

3.1 Moinhos com Meio Moedor

3.1.1 Moinhos Cilíndricos

Os moinhos cilíndricos são utilizados na indústria mineral na moagem, a seco ou a úmido, de minérios ou minerais industriais com alta ou até média resistência a fragmentação. Dependendo do meio moedor, os moinhos podem processar material com granulometrias abaixo, 3 - 4 mm (moinhos de bolas) a 3 - 6 mm (moinhos de barras) e gerar produtos com granulometria entre 5 a 100 μm .

Devido aos altos consumos de energia nos processos de moagem, os moinhos de tambor foram desenvolvidos objetivando baixos consumos específicos de energia. Em moinhos de bolas multicâmaras, o tamanho do meio moedor pode ser melhor adequado à granulometria do material. Na operação dos moinhos em circuito com um classificador, melhoram-se as condições de fragmentação e, conseqüentemente, reduz-se o consumo específico de energia. Dessa forma, obtém-se um aumento considerável da capacidade de produção. Além disso, pode-se variar a granulometria do produto, através do ajuste dos parâmetros do classificador (Fig. 2). Atualmente, tenta-se aumentar a produtividade dos moinhos tubulares através da integração de moinhos de rolos de alta pressão nos circuitos. [25]



a) moinho de câmaras em circuito aberto

b) moinho cilíndrico em circuito fechado

Figura 2 - Circuitos de moagem com moinhos cilíndricos

Na moagem fina, o desempenho dos moinhos cilíndricos é limitado. Atribui-se o fato às condições de esforço não adequadas para partículas finas. Embora meio moedor de pequeno diâmetro possa ser usado para aumentar as taxas de esforço, esse meio moedor não produz energia suficiente para provocar altas taxas de quebra de partículas finas e é a razão pela qual esse tipo de moinho raras vezes é usado na moagem ultrafina de minerais industriais.

3.1.2 Moinhos Vibratórios

Os moinhos vibratórios dividem-se nos tipos com cilindros horizontais e verticais. Os moinhos com cilindros horizontais são adequados para a moagem fina em operação contínua. Nesses, dois ou três cilindros são conjugados num único moinho. Os cilindros alcançam comprimentos de até 4 m, diâmetros de 0,65 m e capacidades de 20-40 t/h. A granulometria da alimentação dos moinhos com cilindros horizontais pode variar entre 1 a 10 mm, permitindo a obtenção de produtos cujos limites superiores da granulometria variam entre 40 e 500 μ m (Figura 3). Os moinhos com cilindros verticais são adequados para a moagem ultrafina em operação descontínua. Esses possuem carcaças com volume de 0,6 até 250 L e são operados com meio-moedores muito finos. (Figura 4)

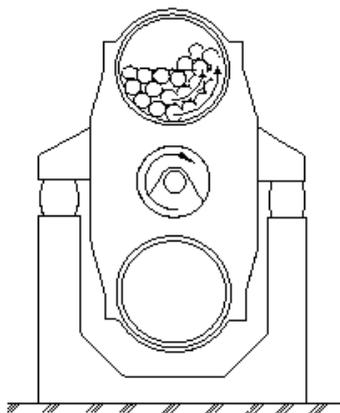


Figura 3 - Moinho vibratório (modelo horizontal)

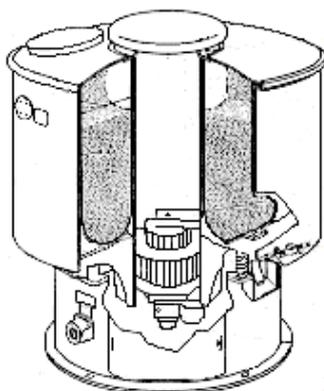


Figura 4 - Moinho vibratório[26] (modelo vertical)

Nos moinhos vibratórios, o meio moedor é movido por vibração provocada pelo movimento oscilante da carcaça, em trajetória circular de alta frequência. Para tal, as carcaças são suportadas elasticamente e acopladas a um sistema de massas centrífugas. Esse movimento específico do meio moedor permite a moagem de materiais friáveis e abrasivos, com resistência alta ou média à fragmentação, tais como escória, quartzo, areias quartzíticas e argila refratária, com baixas taxas de desgaste do moinho e meio moedor. Usam-se vários tipos de meio moedor em quantidade de 60 até 80% (volume).

Nos moinhos vibratórios, a intensidade dos impactos do meio moedor diminui com a distância da parede, razão pela qual os diâmetros dos moinhos horizontais não ultrapassam 0,65 m. Consegue-se uma distribuição mais homogênea de energia quando um dispositivo móvel, chamado roda de câmara, é inserido no moinho. (Figura 5)

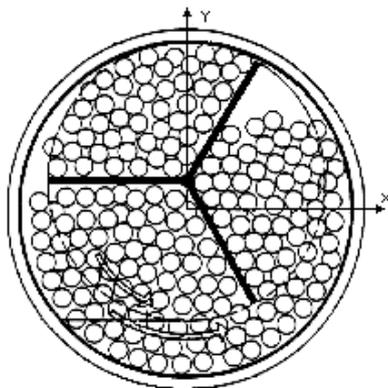


Figura 5 - Moinho vibratório com roda de câmara [27]

A Figura 6 mostra a influência da roda de câmara nos resultados obtidos com a moagem de cascalho quartzítico. Na moagem com esse dispositivo, as frações grossas podem ser totalmente eliminadas, o que não acontece na operação sem o mesmo. Além disso, o moinho pode ser alimentado com cascalho mais grosso sem que a granulometria do produto final aumente significativamente.

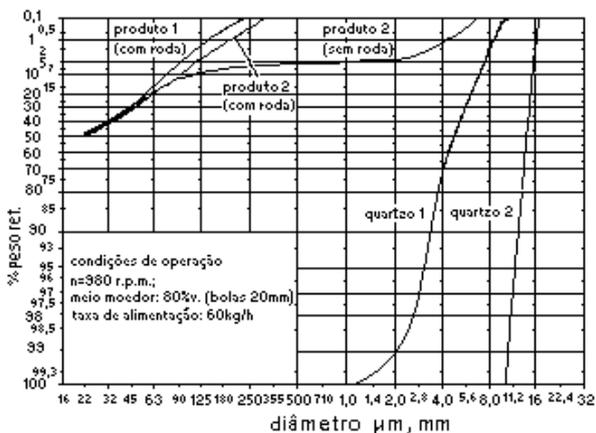


Figura 6 - Granulometria de cascalho moído no moinho Palla U20, com e sem roda de câmara [27]

Um moinho vibratório particular, apresentado na Figura 7, é o chamado moinho centrífugo da Cia. Lurgi. Esse moinho é acionado, ao invés de um sistema oscilante, através de um sistema de condução forçada, que permite acionar o cilindro de moagem com maior raio de oscilação e frequência elevada. Assim, moagens com aceleração de até 16 g podem ser realizadas, adequadas para fins de liga mecânica.[28]

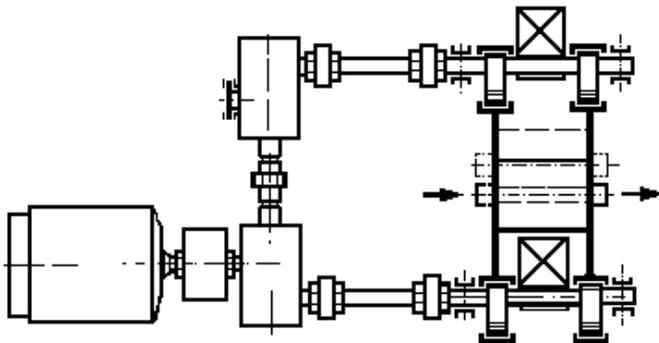


Figura 7 - Moinho centrífugo da Cia. Lurgi [28]

3.1.3 Moinhos Planetários

Os moinhos planetários são usados em escala de laboratório, onde as carcaças têm volumes de 500 mL. As aplicações servem desde a preparação de amostras até a geração de produtos muito finos de liga mecânica. Houve tentativas para aumentar o tamanho desses moinhos e operá-los continuamente; no entanto, essas fracassaram devido aos problemas de resistência das engrenagens e às dificuldades da alimentação e descarga do material.

Os moinhos planetários, apresentados na Figura 8, são assim chamados devido ao movimento das carcaças cilíndricas que deslocam-se em trajetória circular ao redor de um ponto fixo

central - um movimento que lembra o sistema solar. O movimento nessa trajetória proporciona ao processo de moagem fatores de aceleração da ordem de 25 g, os mais elevados dentre os moinhos com meio moedor. Em geral, os moinhos planetários são comercializados com transmissão da engrenagem de -2 e diâmetro do círculo solar ($2r_s$) de 300 mm. Esses podem ser acionados com rotações até 300 rpm e carcaças usadas com diâmetros internos de 50 a 100 mm. Em moinhos planetários, o movimento do meio moedor tem semelhança com o regime *casca* e *catarata* dos moinhos cilíndricos. Contudo, na operação com transmissão positiva, as trajetórias do meio moedor parecem ser estendidas, e na operação com transmissão negativa, comprimidas.[29]

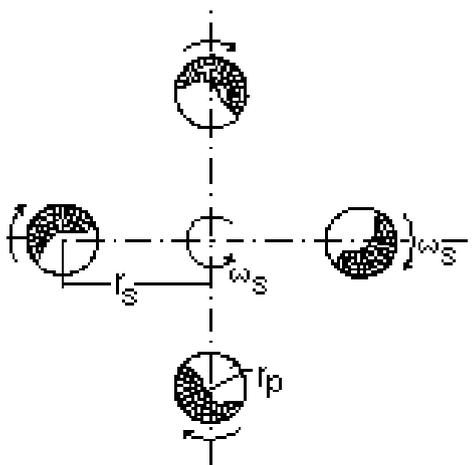


Figura 8 - Princípio de funcionamento de moinhos planetários

A Tabela 2 apresenta uma comparação dos valores característicos dos moinhos vibratório, centrífugo e planetário (relação dos diâmetros R_p/R_s , das velocidades angulares ω_p/ω_s e fatores de aceleração z).

Tabela 2 - Relação dos raios R_p/R_s , velocidades angulares ω_p/ω_s e fator de aceleração z dos moinhos vibratório, centrífugo e planetário

	Moinho vibratório	Moinho centrífugo	Moinho planetário
R_p/R_s	10-100	≈ 1	$< 0,5$
ω_p/ω_s	-1	-1	-2
z	$< 10g$	$< 16g$	$< 25g$

R_p raio interno da carcaça

ω_p velocidade angular da carcaça

R_s raio médio do círculo solar

ω_s velocidade angular na trajetória solar

z fator de aceleração

g aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$)

3.1.4 Moinhos de Atrição

Os moinhos de atrição são indicados para tarefas de moagem fina e ultrafina a úmido, de materiais com resistência baixa ou média à fragmentação, nas indústrias de papel, mineral, química, farmacêutica ou cerâmica. Minérios, esmaltes, tintas de impressão ou tinturaria, pigmentos, agrotóxicos, chocolates, massas cerâmicas ou magnéticas, coberturas para papel, *fillers* minerais e precipitados e outros materiais são moídos a granulometrias ultrafinas nesse tipo de moinho.

Usam-se, como meio moedor, esferas metálicas, de vidro ou de cerâmica, com diâmetros de 0,1 a 8 mm, em quantidade de 80-90% do volume interno. Os moinhos são utilizados nas operações descontínua e contínua. A carcaça cilíndrica desses moinhos é estacionária, podendo ser instalada horizontal ou verticalmente. O meio moedor é movimentado com auxílio de rotores, que giram na câmara de moagem. Em função da velocidade linear dos rotores, os moinhos de atrição são de baixa e alta velocidade. Nos *attritors*, a velocidade linear dos rotores está abaixo de 4 m/s, enquanto os rotores nos *stirred mills* atingem velocidades entre 4 e 20 m/s.[30]

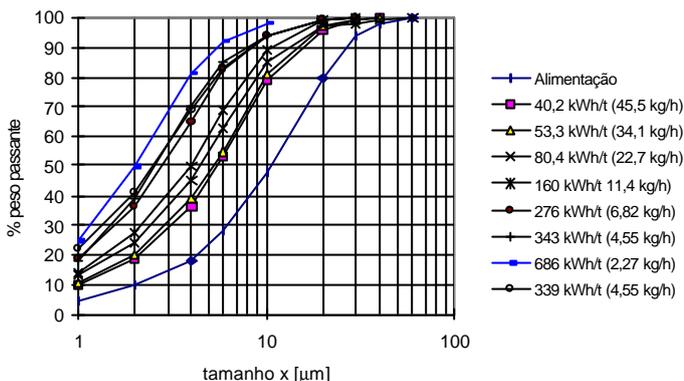
A Figura 9 apresenta um moinho de atrição de baixa velocidade, que, devido a sua altura considerável, também é

chamado moinho de torre ou *Tower Mill*. Esses moinhos são operados em circuito fechado com um classificador estático. O meio moedor, no interior da carcaça, é movimentado com rotores que têm a forma de discos ou roscas. A altura de carregamento com meio moedor é um critério importante na operação dos moinhos de torre, como também é responsável por uma pressão adequada na parte inferior do cilindro. Os moinhos de torre foram desenvolvidos nos anos 50 no Japão, e são usados na indústria mineral dos EUA, Canadá e Austrália.



Figura 9 - Moinho de torre KW-3 com baixa velocidade [31]

A Figura 10 apresenta os resultados da moagem de alumina hidratada usando o moinho de torre KW-3. Dos oito testes realizados, sete foram em circuito aberto e apenas um em circuito fechado, cujo consumo de energia foi de 339 kWh/t. A taxa de alimentação variou entre 2,3 e 45,5 kg/h.



meio moedor: 1174 kg bolas de aço (6-12 mm)
 percentagem de sólidos: 56-33 %

Figura 10 - Distribuição granulométrica dos produtos de moagem de alumina hidratada usando o moinho de torre KW-3 [31]

Os primeiros moinhos de atrição de alta velocidade, como o *Sand-Mill* da Cia. Du Pont, foram desenvolvidos na década de 1950. Nesses, a câmara de moagem ainda foi aberta. Como o ar pôde entrar na carga, ocorreu com freqüência o colapso do processo. Nos moinhos de atrição de alta velocidade com cilindros fechados não entra ar na carga. Estes são operados sob pressão, inteiramente preenchidos com meio moedor e suspensão. As carcaças desses moinhos têm volumes de 0,2 - 1000 L, e meio-moedores muito finos, até 0,1 mm, podem ser usados. A carga e o meio moedor são movimentados com rotores, onde são fixados elementos tais como discos, discos perfurados, pinos, entre outros. Assim, a velocidade do rotor e a energia do meio moedor podem ser variadas dentro de amplos

limites. A alimentação é feita através da base plana do cilindro e a descarga no lado oposto. O material a ser moído pode ser alimentado juntamente com o meio moedor, e separado numa outra etapa, ou o meio moedor é capturado dentro do moinho. Nesse caso, efetua-se a separação usando conjunto de peneiras ou fendas de separação, que fazem parte integral dos moinhos. A Figura 11 mostra o desenho do moinho de atrição da Cia. DRAIS que possui um cilindro resfriável. Nesse, o meio moedor é movimentado com um rotor equipado com discos perfurados. A separação do meio moedor do material moído é feita com uma fenda que se encontra no lado de acionamento.

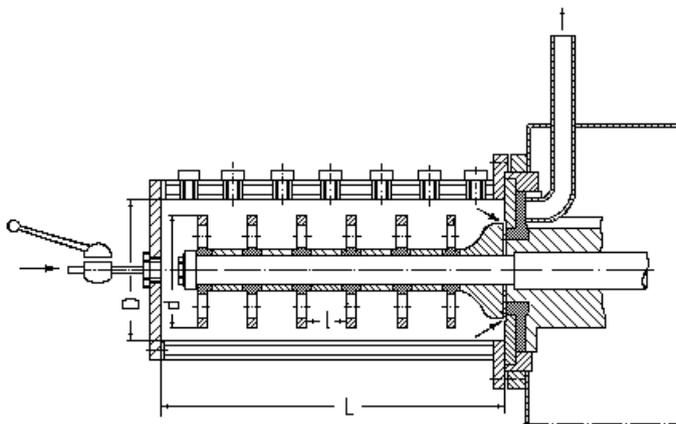
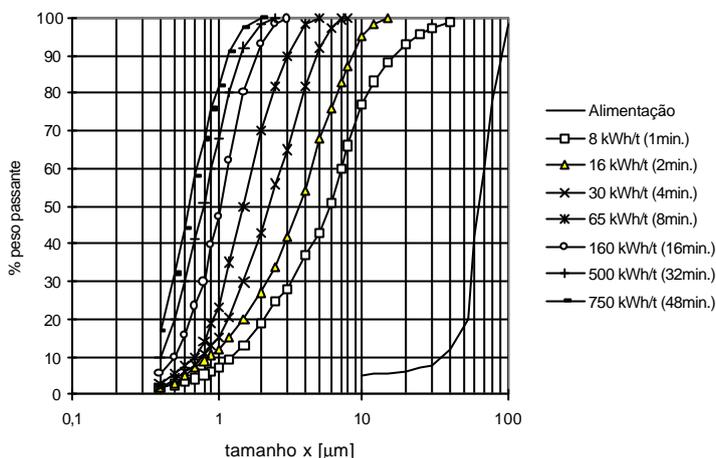


Figura 11 - Moinho de atrição com alta velocidade da Cia. DRAIS [32]

A Figura 12 mostra resultados da moagem de calcário com o moinho de atrição Draiss com 5 L de volume. Os testes foram conduzidos em operação descontínua, e os tempos de moagem variaram entre 1 e 48 min. A determinação dos consumos de energia baseou-se na potência mecânica medida no eixo do moinho. Da potência mecânica medida subtraiu-se a potência relativa à operação sem carga (atrito de vedação)[32].



carga de meio moedor: 80% v.
 meio moedor: esferas de vidro (1 mm)
 percentagem de sólidos: 40% m.
 velocidade: 9,6 m/s

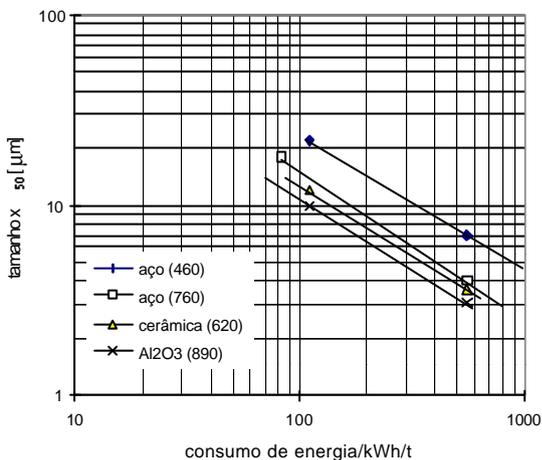
Figura 12 - Distribuição granulométrica dos produtos da moagem de calcário com o moinho de atrição Drais [32]

Na Figura 12 observa-se que no *stirred mill*, com menor consumo de energia, podem ser gerados produtos muito finos, com faixas estreitas nas distribuições granulométricas. Por isso, os moinhos de atrição de alta velocidade, em muitas aplicações, podem ser operados em circuito aberto. Obtém-se uma redução do consumo de energia quando se faz a moagem em estágios. Isso é, no primeiro estágio utiliza-se um meio moedor de maior tamanho, diminuindo essas dimensões nos estágios seguintes.

Recentemente, os moinhos de atrição de alta velocidade foram adaptados para moagem ultrafina de materiais abrasivos e cerâmicos. Para esse fim, os moinhos são revestidos com aços especiais, metais duros, cerâmicas ou polímeros. Na preparação de materiais para sinterização, o modo de operação dos moinhos

é descontínuo. Assim, não há falhas nas aplicações da indústria cerâmica, onde até poucas partículas grossas restantes podem causar efeitos danosos.

A Figura 13 mostra o desempenho do moinho de atrição DRAIS na moagem descontínua de coríndon fundido em função do tamanho médio das partículas (x_{50}), consumo específico de energia e tipo de meio moedor.



meio moedor: esferas de 1,5 mm

entre parêntesis: dureza de *Vickers*

Figura 13 - Tamanhos médios das distribuições granulométricas dos produtos da moagem de coríndon fundido no moinho de atrição DRAIS, com vários meio-moedores [32]

Nos moinhos de atrição de alta velocidade, ocorrem os processos de fragmentação num fluxo de corte. Este é gerado pela rotação do rotor; no entanto, pode ser gerado entre duas superfícies planas movimentadas com velocidade relativa. Em moinhos de fenda, o rotor e estator não são equipados com

elementos de moagem. A câmara de moagem é plana e consta da fenda entre o rotor e o estator.

A Figura 14 mostra um moinho de fenda com cone duplo. O moinho opera com carga de meio moedor correspondente a 90% do volume interno. Usando vedações com diferentes espessuras, é possível ajustar a espessura da fenda ao tamanho do meio moedor. O moinho é adequado à moagem de materiais resistentes e abrasivos, no caso do rotor e estator serem revestidos com materiais refratários.

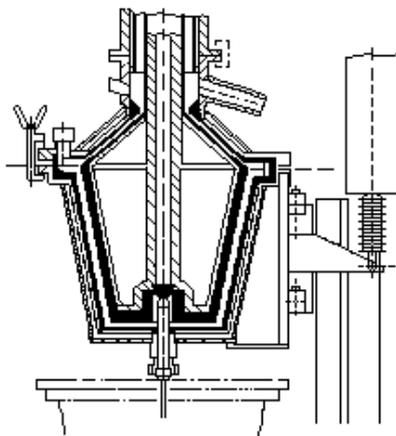


Figura 14 - Moinho de atrição com um rotor cônico [33]

3.2 Moinhos de Choque

Na cominuição por choque, a energia de ruptura é oriunda da energia cinética das partículas e liberada durante um processo de choque. Para tal, as partículas são aceleradas com rotores ou por jatos de gás, e, em seguida, se chocam com elementos de moagem ou outras partículas. Durante os choques, a energia cinética é, parcialmente, transformada em energia de

deformação, resultando na quebra das partículas, quando a resistência das mesmas é ultrapassada. Como nem toda energia elástica estocada é dissipada nas rupturas, as partículas fragmentadas dispersam-se numa nuvem de material em forma de cone, após a quebra. Em termos energéticos, consideram-se os choques com elementos de moagem mais eficientes que os entre partículas. Contudo, a cominuição em moinhos a jato é baseada em choques partícula-partícula. Com jatos de gás, as partículas podem ser aceleradas a velocidades superiores a 160 m/s, o que não é possível em moinhos com rotor. Embora o esforço de choque requeira forças de quebra relativamente pequenas, a utilização de energia não é muito elevada, e no processamento de materiais abrasivos o desgaste é um problema sério.

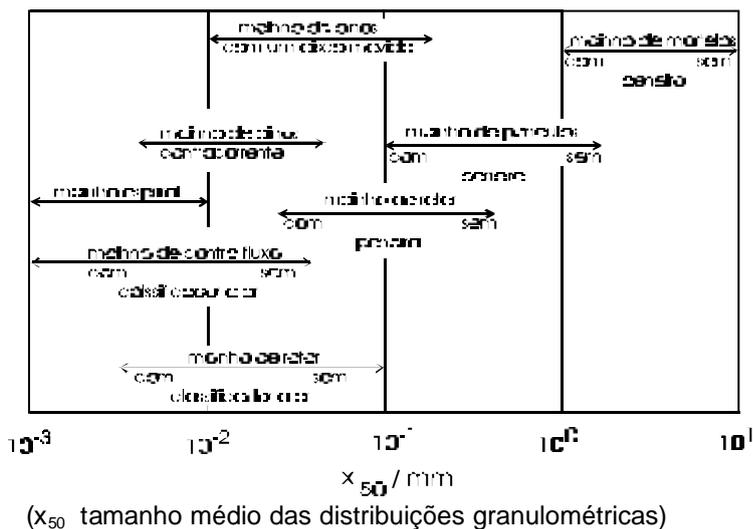


Figura 15 - Granulometrias de produtos moídos em moinhos de choque [34]

O diagrama da Figura 15 apresenta uma visualização das faixas granulométricas correspondentes aos principais moinhos de choque: moinho de martelo, moinho universal, moinho de pinos, moinho de rotor e moinhos a jato (moinho espiral, de contrafluxo) na operação com e sem classificador[34].

3.2.1 Moinhos com Rotor

Os moinhos com rotor têm aplicações desde a faixa granulométrica correspondente à britagem primária até a moagem fina, de materiais pouco abrasivos, dureza de *Mohs* menor que 4. Em britadores de impacto são processados calcários, dolomitos, material bruto para produção de cimento, cal ou gesso; em moinhos de rotor calcários, cereais, temperos, açúcar ou sal. Os moinhos de rotor reduzem as partículas a tamanhos médios (x_{50}) de 10 a 100 μm ou 3 a 10 μm , caso o moinho for combinado com um classificador. Dependendo da granulometria e do tipo de material, as velocidades lineares dos rotores variam entre 20 e 130 m/s. Em certos modelos, adequados à moagem de metais ou plásticos, a câmara de moagem pode ser resfriada para tornar o material mais quebradiço (processo criogênico).

Os diâmetros das partículas na alimentação dos moinhos com rotor devem ser de 8 a 10 vezes menores que a distância entre rotor e placas de choque, para que não ocorram impactos entre dois planos, o que devido às perdas de atrição, seria pouco eficiente. Também, a concentração de material na câmara de moagem tem que ser limitada, para que os choques entre partículas não-tornem-se predominantes. Isso é possível através do controle da taxa de alimentação e/ou combinação do moinho com um classificador a ar. Os moinhos de choque adequados para a moagem fina podem ser divididos em quatro grupos: moinhos universais, de pinos, de rotor e moinhos combinados com classificadores.

Em moinhos universais diferentes rotores e estatores podem ser usados na mesma carcaça, tais como placas, pêndulos etc. (Fig. 16). Nesses, faz-se a alimentação pelo centro, e a descarga pela periferia. Na periferia encontram-se elementos de moagem e as aberturas de descarga. Nessas, podem ser colocadas peneiras para aumentar ou reduzir o tempo de residência do material no moinho. Nas moagens com maiores tempos de residência, usa-se apenas uma peneira na abertura superior e fecha-se a inferior.

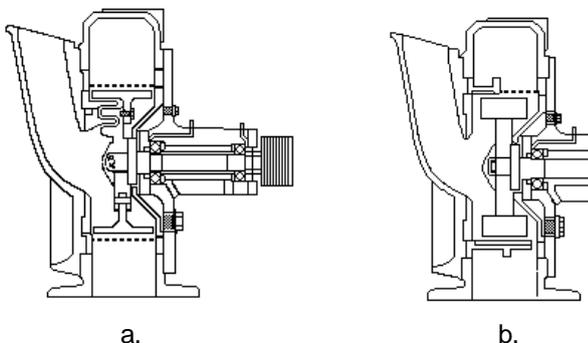


Figura 16 - Esquemas representativos: (a) moinho com rotor de pêndulos e (b) moinho com rotor de placas [34]

Os moinhos de pinos possuem rotores e estatores equipados com pinos. Esses são colocados em círculos concêntricos (Fig. 17). A distância entre os círculos, geralmente, é maior nos círculos próximos do centro e diminui para fora. O material alimentado na zona central passa, transportado por forças centrífugas, do centro à periferia, em trajetórias espirais. Nesse caminho ocorrem os choques com os pinos que resultam na cominuição.

Para as partículas finas e, particularmente, ultrafinas, a probabilidade de choques com energia suficiente de quebra diminui, rapidamente, com o tamanho do grão. De um lado a resistência à fragmentação aumenta na granulometria fina, e, do

outro, as perdas de energia cinética aumentam pelo atrito de ar. Isso justifica a operação desses moinhos com velocidades de rotores elevadas. As moagens com velocidades lineares de 130 m/s proporcionam a obtenção de produtos cuja granulometria apresenta-se com 50% abaixo de 10 μm . Essa velocidade representa um limite, que, por razões da resistência mecânica dos moinhos, não pode ser ultrapassado. As velocidades relativas acima de 130 m/s podem ser atingidas quando o estator é acionado em sentido contrário ao rotor. Nesse caso, as velocidades relativas chegam a 250 m/s, sendo possível gerar produtos com 50% abaixo de 5 μm . (Fig. 17 b)

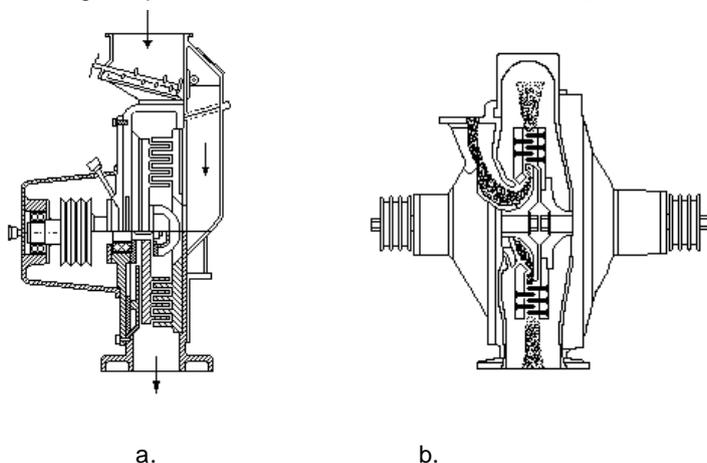
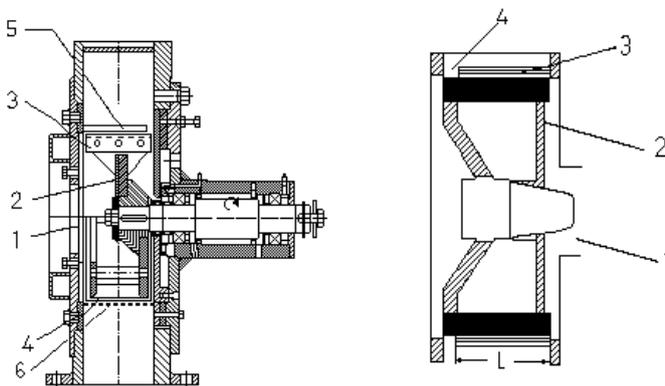


Figura 17 - Esquemas representativos: (a) moinho de pinos com um disco propulsionado e (b) moinho de pinos com dois discos propulsionados [34]

Em moinhos de rotor (Fig. 18), este não só tem a função de transmitir energia cinética às partículas, mas também gerar um fluxo de ar, que serve para o transporte do material através do moinho. No seu caminho pelo moinho, as partículas alimentadas ao interior do rotor se chocam com as extremidades interiores e os elementos do rotor, antes que essas entrem na fenda de moagem, onde ocorrem choques com as extremidades

exteriores do rotor e os elementos de moagem na periferia. O material sai do moinho por uma fenda de descarga no lado oposto da alimentação ou por peneiras situadas na periferia. Para o ajuste da intensidade dos esforços às necessidades do material, as velocidades lineares do rotor podem ser variadas numa faixa entre 20-130 m/s. A granulometria dos produtos pode ser influenciada pelo tempo de residência, que está relacionado ao fluxo de ar que é bombeado através da abertura de descarga. Uma outra possibilidade de alterar o tempo de residência é a utilização de rotores fechados, que forçam passagens das partículas através de todo compartimento do rotor.



a.

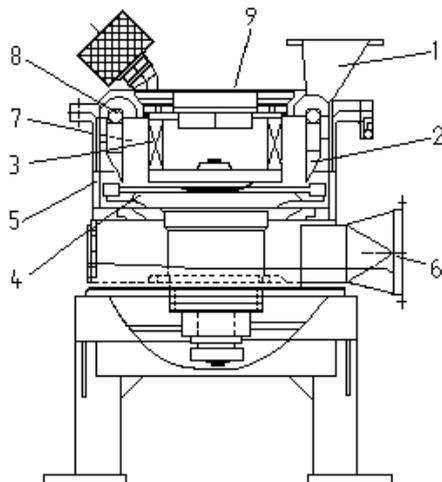
b.

- | | | |
|-----------------------|------------|----------------------|
| 1. alimentação | 5. estator | 1. alimentação |
| 2. rotor | 6. peneira | 2. rotor fechado |
| 3. elemento de choque | | 3. fenda de moagem |
| 4. fenda de moagem | | 4. fenda de descarga |

Figura 18 - Esquemas representativos: em (a) moinho de choque com rotor aberto e em (b) moinho de choque com rotor fechado[34]

Os esforços de choque geram distribuições com faixas granulométricas relativamente largas. Aumenta-se o desempenho dos moinhos através da sua combinação com classificadores.

Os classificadores retiram as partículas que já possuem a granulometria desejada, evitando-se gastos de energia desnecessários. Ao mesmo tempo, aumenta-se o tempo de residência para as partículas mais grossas.



- | | |
|--------------------------|---|
| 1. alimentação | 5. estator |
| 2. condução de ar | 6. entrada de ar descarga |
| 3. roda de classificação | 7. recirculação de material grosso |
| 4. rotor | 8. recirculação de material intermediário |

Figura 19 - Moinho de rotor combinado com classificador de alto desempenho [35]

A Figura 19 mostra o moinho de rotor combinado com um classificador dinâmico. Observa-se que o tamanho desse moinho é mais determinado pela extensão da parte de classificação que da moagem. O material é forçado a passar na zona de moagem, seguindo o fluxo de ar até a região de classificação, onde as partículas finas são retiradas. Em seguida, o material grosso é reconduzido à zona de moagem, juntamente com a alimentação. Quando combinam-se moinhos com classificadores dinâmicos de alta velocidade, podem ser gerados produtos cujas

distribuições granulométricas apresentam-se com 50% menores que 3 μm .

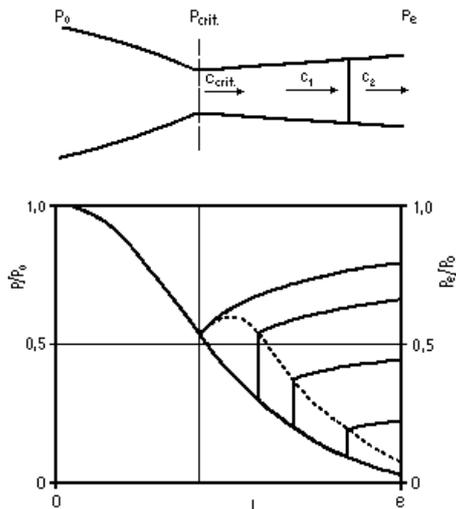
3.2.2 Moinhos a Jato

Os moinhos a jato são usados em várias tarefas das moagens fina e ultrafina a seco de materiais plásticos ou friáveis, pouco ou muito abrasivos, resistentes ou não resistentes à fragmentação. Logo, são adequados para moer materiais, tais como abrasivos, grafite para impressão, talco, resinas, farmacêuticos, cerâmicos e quartzo de alta pureza. A distribuição granulométrica do material na alimentação desses moinhos pode variar desde dezenas de micrômetros a milímetros. Os moinhos têm capacidade entre 2 a 6000 kg/h na moagem ultrafina, obtendo-se um produto final com granulometria abaixo de 2 ou 3 μm . Nesses equipamentos a energia cinética é transmitida às partículas por expansão de gás. Usa-se ar comprimido, vapor superaquecido ou gases inertes em algumas aplicações como meio energético. Usando ar, a pressão inicial varia na faixa de 5-15 bar, à temperatura ambiente, para moagens de materiais sensíveis ao calor. Devido ao efeito de resfriamento pela expansão adiabática, o material atinge apenas a temperatura do ambiente na descarga. Alcançam-se maiores velocidades de jato e maior economia do processo usando-se vapor super aquecido, temperatura na faixa de 315-370⁰C e pressão entre 14 e 20 bar. Nessas condições, a pressão na câmara de moagem varia entre 1,2 - 3 bar, sendo reduzida pela carga. Os materiais que apresentam ductilidade ou plasticidade podem ser moídos a jato, num processo criogênico. Neste processo, o material da alimentação e o gás dos jatos são resfriados. Esse procedimento aumenta significativamente o consumo de energia da moagem, pois a velocidade dos jatos depende da temperatura do gás. Num processo criogênico recente, apenas a câmara de moagem é resfriada por injeção de nitrogênio líquido. Esse processo caracteriza-se por consumos de energia reduzidos.[36, 37]

A cominuição nos moinhos a jato ocorre por choques partícula-partícula, o que torna o processo praticamente livre de contaminação. Reduz-se ainda o baixo desgaste quando a câmara do moinho é revestida com materiais refratários, tais como metal duro, borrachas especiais ou elastômeros de poliuretano. Quando são usados revestimentos de materiais plásticos, algumas medidas de descarregamento elétrico devem ser consideradas, tais como perfuração das superfícies planas e ligação do moinho à terra. A moagem de substâncias explosivas pode ser efetuada em moinhos com estruturas reforçadas. Os materiais passíveis de moagem a jato devem possuir valores agregados elevados frente aos consumos elevados de energia: 500 a 2.000 kWh/t na moagem ultrafina.[38]

Acelera-se o gás de moagem em jatos, tipo *Laval*, com ângulos de abertura na parte supersônica relativamente pequenos, menor que 10° . Assim, a pressão do gás na saída não diminui a valores inferiores à pressão atmosférica, sendo a operação segura, sem estalos supersônicos que desgastam os jatos. As linhas verticais na Figura 20 visualizam os aumentos súbitos de pressão, quando as diferenças de pressão entre o ambiente e o gás na saída do jato ultrapassam um certo valor.

Os moinhos a jato podem ser alimentados com injetores ou roscas. Os injetores suspendem o material num fluxo de gás e o carregam para a câmara de moagem. Os injetores tipo *Venturi* (diâmetros 10-20 mm) são operados com a mesma pressão dos jatos, e alimentam uma quantidade de 20 a 40% da massa total do gás no moinho. Essa adição reduz significativamente a velocidade de fluxo na câmara e o efeito de moagem. Visando reduzir a adição de gás, foram desenvolvidos injetores mais sofisticados, que podem ser operados com pressão inicial baixa, de apenas 0,2-0,3 bar. Na alimentação com roscas evita-se a adição de ar. Contudo, em comparação aos injetores de alimentação, seus custos de investimento são elevados e o manuseio é mais complexo.[39]



p: pressão, c: velocidade, L: comprimento do jato

Figura 20 - Pressão no jato Laval na expansão de ar em função da pressão p_e na saída [36]

A Figura 21 mostra o moinho *Pulvajet*, que possui uma câmara de moagem em forma oval. No dobramento inferior do tubo encontra-se a zona de moagem, e no superior a zona de classificação. A alimentação é feita com auxílio de um injetor na zona de moagem, onde o material é acelerado e moído através dos choques entre as partículas. Em seguida, as partículas finas ascendem até a zona de classificação, no dobramento superior do tubo. Retiram-se as partículas finas num fluxo de gás, enquanto as partículas grossas ficam no moinho, sendo submetidas à fragmentação, juntamente com o material da alimentação nova. A Figura 22 mostra os resultados da moagem de talco com o moinho *Pulvajet*. O talco utilizado nos testes é proveniente do norte europeu. Como meio energético foi usado vapor a 315°C e pressão de 13,8 bar. A taxa de alimentação do material no moinho em relação ao ar (μ) foi de 1 kg talco / kg vapor.

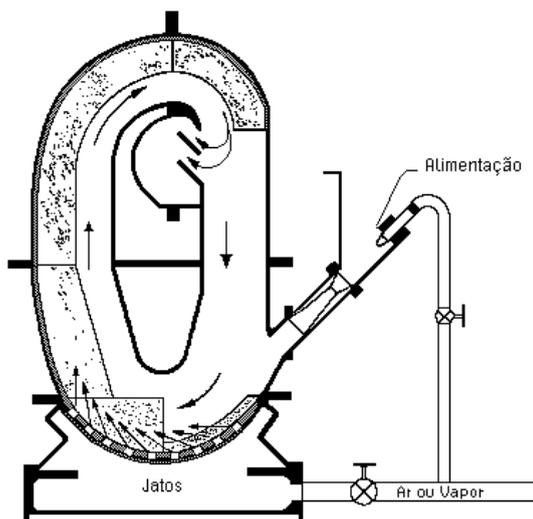
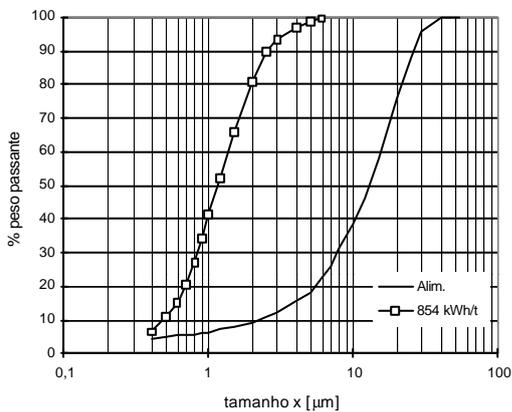


Figura 21 - Moinho a jato *Pulvajet* da Cia. *Aljet*. [39]



= 1 kg sólidos/1 kg ar

Figura 22 - Distribuição granulométrica dos produtos de moagem de talco com o moinho *Pulvajet* da Cia. *Aljet*. [39]

O moinho a jato espiral *Micronizer* consiste de uma câmara de moagem cilíndrica, com as dimensões características (Fig. 23):

$$h_i = (1-2) \cdot r_i$$

$$r_i = 0,15 \cdot r_a$$

onde:

h_i altura do cilindro na zona de descarga;

r_i raio da descarga;

r_a raio do cilindro.

Na periferia da câmara cilíndrica de moagem são instalados os jatos de gás, cujo ângulo varia com a tangente de 30 e 75°. O material é alimentado com injetores, acelerado pelos jatos de gás e moído por choques entre as partículas. Na zona central do moinho ocorre a classificação num processo semelhante ao dos ciclones.[39]

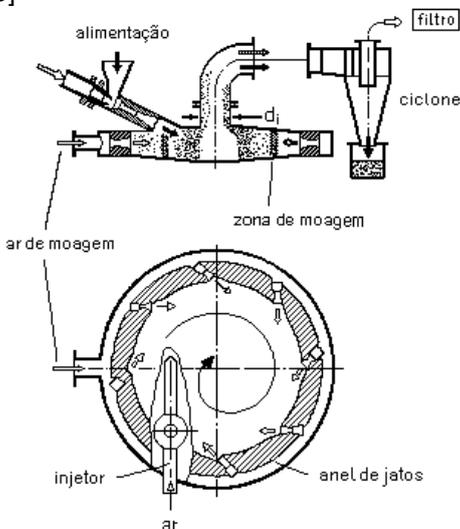


Figura 23 - Esquema do moinho espiral *Micronizer* da Sturtevant Mill Co. [41]

Resultados de análises conduzidas com o moinho espiral *Micronizer* mostram que a velocidade angular descrece significativamente com o aumento da taxa de sólidos. Supõe-se que a desaceleração na faixa de carregamento μ abaixo de 0,1 deve-se à transferência de impulso às partículas. Na faixa de carregamento μ acima de 0,1 o atrito com a parede é um outro fator que resulta em desaceleração da velocidade angular. As diferentes curvas da desaceleração, no diagrama da Figura 24, mostram que, além da densidade, outras propriedades dos materiais influenciam a desaceleração do fluxo de gás. Nos resultados de moagem percebe-se que a velocidade angular é essencial para o efeito de moagem.[37]

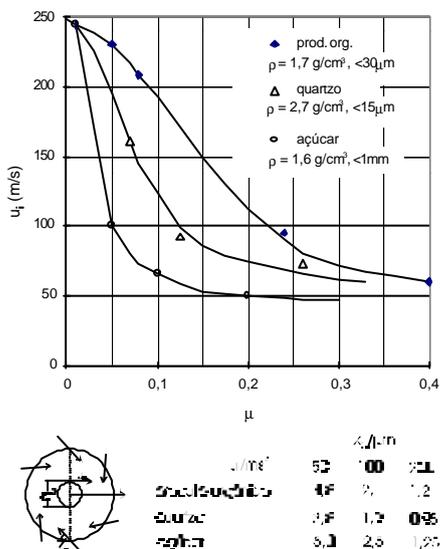


Figura 24 - Velocidade do fluxo e resultados de moagem do moinho espiral *Micronizer* [37]

A Figura 25 apresenta um moinho a jato *AFG 100* da Cia. Alpine, com leito fluidizado, que dispõe de classificador integrado à própria carcaça e um alimentador de rosca. Essa concepção permite otimizar, de forma independente, os processos de

moagem e classificação, bem como controlá-los através de sistemas de medição e regulação, necessários na operação automatizada. Esse moinho, possuindo um diâmetro interno de 100 mm, foi operado com pressão dos jatos de 6 bar e alimentado com 0,01 a 0,4 kg sólidos a cada kg ar. O diagrama da Figura 26 apresenta os resultados de moagem. Observa-se que a granulometria dos produtos aumenta em função do fator μ . Os melhores resultados são obtidos na operação com valores μ menor que 0,1. Na operação com fluxos de massa baixos, as distribuições granulométricas dos produtos são mais finas e apresentam faixas granulométricas estreitas.[37]

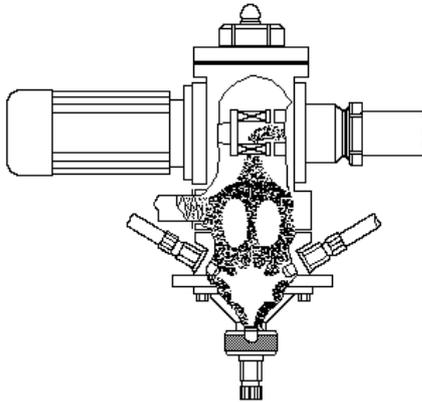


Figura 25 - Moinho a jato com leito fluidizado [37]

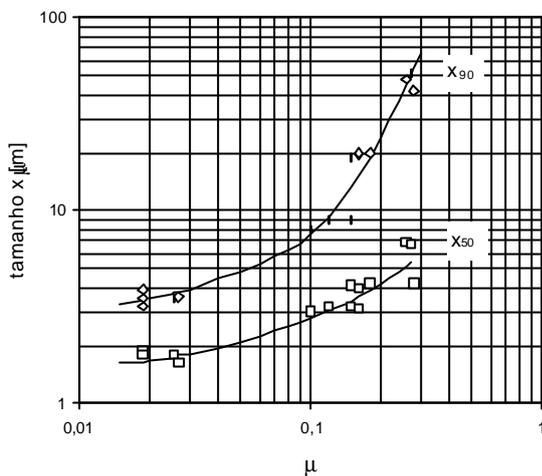


Figura 26 - Tamanhos de partícula x_{50} e x_{90} das distribuições granulométricas de calcário moído no moinho a jato com leito fluidizado AFG 100 da Cia. Alpine.[37]

3.3 Moinhos de Rolos

Os moinhos de rolos são utilizados na moagem fina de materiais com baixa a média resistência à fragmentação, tais como carvão, linhito, calcário, cal, argilas, entre outros. Nesses moinhos, o material a ser moído é submetido às forças de fragmentação na fenda entre um rolo e um plano de moagem ou na fenda entre dois rolos. Uma característica tanto dos moinhos de rolos com plano de moagem quanto dos moinhos de rolos de alta pressão é que a moagem é efetuada, predominantemente, por forças de pressão que são aplicadas a camadas de material.

3.3.1 Moinhos de Rolos com Plano de Moagem

Os moinhos de rolos com plano de moagem operam de forma conjugada com um classificador integrado à própria carcaça do moinho. Pode-se usar, além do ar, gases para a classificação. Em alguns casos, como operação conjunta com termelétrica, usa-se gás aquecido, proveniente da própria termelétrica, permitindo a moagem de carvão ou linhito com umidade entre 8 e 15%. Nesses moinhos, as forças de moagem são aplicadas ao material através de um sistema de rolos que giram em contato com uma superfície plana chamada de plano de moagem. Alguns modelos, como moinhos pendulares, possuem um plano de moagem vertical, que é estacionário. Em contato com o mesmo giram os rolos, movidos por um sistema de acionamento central. Em outros modelos, como moinhos de rolos verticais, o sistema de rolos é estacionário e o plano de moagem horizontal é acionado (Figura 27). Em moinhos pendulares os rolos são pressionados no plano de moagem apenas pelas forças centrífugas; já nos moinhos de rolos verticais os mesmos são pressionados no plano de trabalho através de sistemas de molas ou hidráulicos, permitindo a adequação da velocidade e da força de moagem, independente das necessidades dos materiais. Há algumas expectativas dos fabricantes desses moinhos na expansão da área de aplicação aos materiais abrasivos e resistentes, usando-se rolos revestidos com materiais refratários e, em analogia com os moinhos de rolos de alta pressão, operá-los com forças de pressão elevadas. Uma outra tendência, visando reduzir o consumo específico de energia, é a substituição do transporte pneumático, entre as zonas de moagem e classificação, por um sistema mecânico[42, 43].

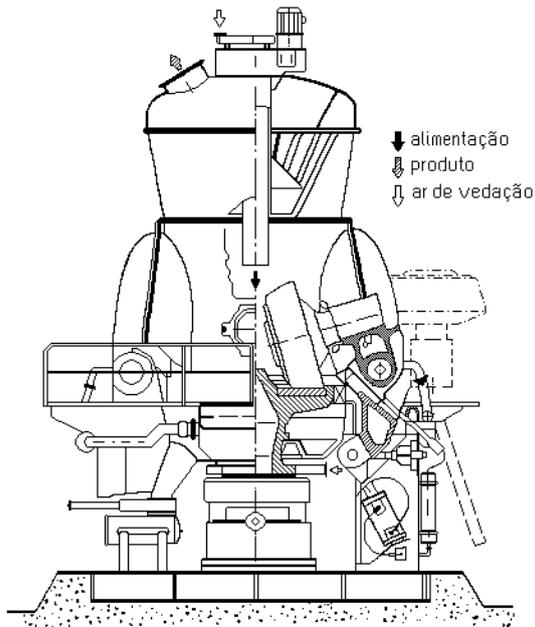


Figura 27 - Moinho de rolos verticais tipo *Loesche*. [43]

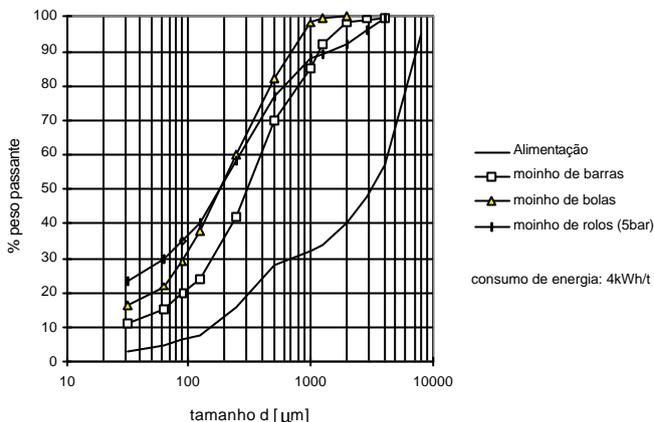
A Tabela 3 apresenta alguns dados operacionais desses equipamentos.

Tabela 3 - Principais dados operacionais dos moinhos de rolos com plano de moagem.[42]

capacidade	5- 5000 t/h
d ₉₇ (produto)	0,025-1,5 mm
potência do motor de propulsão	50-5000 kW
consumo específico de energia (motor)	4-25 kWh/t
consumo específico (motor e classificador)	10-35 kWh/t

3.3.2 Moinhos de Rolos de Alta Pressão

Os moinhos de rolos de alta pressão foram desenvolvidos com base na patente de *Schönert*, e comercializados a partir do ano de 1984. Os moinhos consistem de uma armação que suporta dois rolos, um fixo e um solto. As forças de moagem, na ordem de 50 a 130 kN/cm, são transmitidas ao rolo solto com auxílio de cilindros hidráulicos. A alimentação dos moinhos é feita em excesso para que se forme uma camada de material na fenda entre os dois rolos. Na passagem pela fenda, essa camada é comprimida, resultando na geração de fraturas e quebra de partículas. Devido à densificação, o material na descarga apresenta-se compactado e tem que ser disperso numa outra etapa do processo. A dispersão se faz com moinhos de tambor ou moinhos de martelo de baixa velocidade (20-25 m/s), sendo a dispersão em moinhos de martelos mais econômica, caso as propriedades técnicas dos materiais não revelam alterações indesejáveis. A distribuição granulométrica do produto disperso apresentam, porém, faixas amplas, com maiores quantidades de partículas finas[44, 45] (Figura 28).



- a) moinho de alta pressão: $\text{Ø}=350$ mm, $L=100$ mm, $n=60$ min^{-1} (1,1 m/s).
 b) moinho de barras: $\text{Ø}=1000$ mm, $L=1800$ mm, $n=0,71 \cdot n_{\text{crit.}}$, perc. sol.=50%
 meio moedor: barras 600 kg
 (66%, $\text{Ø}=75$ mm; 34%, $\text{Ø}=45$ mm).
 c) moinho de bolas: $\text{Ø}=1600$ mm, $L=1600$ mm, $n=0,72,5 \cdot n_{\text{crit.}}$, perc. sol. =50%
 meio moedor: bolas 400 kg
 (50%, $\text{Ø}=25$ mm; 50%, $\text{Ø}=50$ -60mm).
 a) - c):
 vazão=0,5 -2,0t/h

Figura 28 - Dados comparativos entre a moagem de minério de cromita em moinhos de rolos de alta pressão e moagem convencional (bolas e barras).[46]

Na escala industrial, com cimento e calcário, os moinhos de alta pressão apresentam baixo desgaste, representando apenas 1/10 a 1/100 dos moinhos de tambor. Também proporcionam baixo consumo específico de energia da moagem, sendo esse de 15 a 40 % menor que em circuitos convencionais. Nos circuitos, os moinhos de rolos de alta pressão são utilizados no estágio primário ou operados em combinação com um moinho de martelos. (Figura 29) [47]

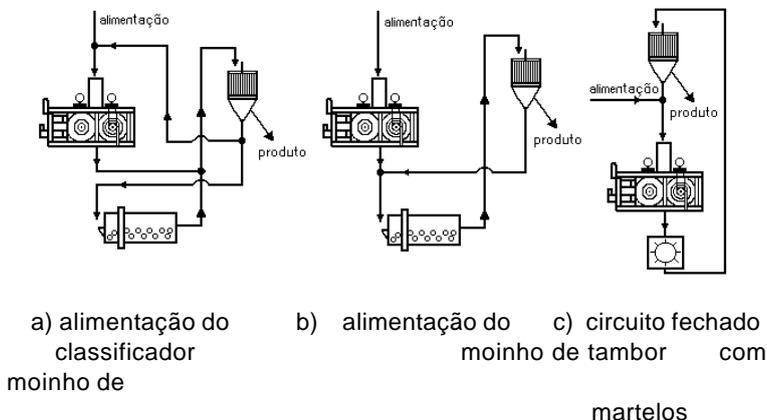


Figura 29 - Utilização de moinhos de rolos de alta pressão em circuitos de moagem.[47]

Na indústria de mineração, moinhos de rolos de alta pressão vêm sendo usados em quantidade crescente na moagem de minérios de ouro, diamante, ferro ou cromita. Nessas aplicações, o mecanismo de fragmentação nesses moinhos pode ter um efeito positivo para as etapas seguintes de beneficiamento, tais como lixiviação de minério de ouro ou separação de diamantes de kimberlit[48].

Embora estudos em escala piloto mostrassem que os moinhos de rolos de alta pressão geram produtos ultrafinos com bom rendimento energético, por enquanto não são utilizados para esse fim. Nessa aplicação, a maior dificuldade é a alimentação uniforme do material à fenda. A Tabela 4 apresenta os consumos específicos de energia obtidos nas moagens fina e ultrafina a granulometrias 97% menores que 60, 10 e 5 μm com o moinho *Ecoplex* da Cia. *Alpine*[49].

A Tabela 5 apresenta outros dados operacionais dos moinhos de rolos de alta pressão.

Tabela 4 - Consumo de energia na moagem fina e ultrafina num moinho de rolos de alta pressão [49].

Material	Consumo específico de energia (kWh/t)		
	$d_{97} < 60 \mu\text{m}$	$d_{97} < 10 \mu\text{m}$	$d_{97} < 5 \mu\text{m}$
calcário	8	18	35
areia de zirconita	22	70	140
carbeto de silício	21	130	350

Tabela 5 - Dados de moinhos de rolos de alta pressão (escalas piloto e industrial). [45-51]

capacidade	50 - 550 t/h
potência instalada	80 - 2400 kW
peso	25 - 300 t
força de pressão	1.500 - 25.000 kN, 50 - 130 kN/cm
velocidade linear	0,9 - 1,8 m/s
consumo de energia	2 - 5 kWh/t
largura dos rolos	40 - 160 cm
diâmetro dos rolos	50 - 140 cm (max. 280 cm)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As moagens fina e ultrafina podem ser conduzidas em vários tipos de moinhos, que se diferenciam nos seus mecanismos de fragmentação. Todos esses moinhos têm as limitações que lhes são particulares e, por isso, as instalações de moagem devem ser concebidas através de avaliações técnicas e econômicas.

Nas instalações modernas de moagem, a seleção de um determinado moinho é feita através de estudos detalhados em escalas de laboratório e piloto. Nesse contexto, são estudadas, entre outras, as possibilidades de utilização de moinhos autógeno, de rolos com plano de moagem, de rolos de alta pressão, de torre etc., e são avaliadas as vantagens e desvantagens de cada um deles, envolvendo entre outros os aspectos técnicos, operacionais e econômicos. Os moinhos de rotor, na moagem de materiais friáveis, e os moinhos vibratórios, na moagem de materiais abrasivos, podem representar uma alternativa em indústrias onde menores capacidades e maior flexibilidade operacional são requeridas. A moagem ultrafina pode ser conduzida a seco em moinhos de choque, ou a úmido em moinhos com meio moedor. Os moinhos de choque dividem-se nos moinhos com rotores e a jato. O equipamento mais versátil dos moinhos de choque são os moinhos a jato. Esses são adequados para as moagens fina e ultrafina, de materiais friáveis ou resistentes, com pouco desgaste, e até material sensível ao calor pode ser processado. Contudo, os custos elevados de operação dos moinhos a jato permitem a sua utilização apenas em casos onde a aplicação de outros moinhos, tais como de rotor ou de atrição, não é viável. Entre os moinhos com meio moedor, o moinho de atrição, de alta velocidade ganhou importância na moagem industrial nos últimos anos. Nesse caso, o calcário natural pode ser reduzido a granulometrias que apresentam-se com 100% menores que 2 a 3 μm , com consumos específicos de energia relativamente baixos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi fomentado pelo CETEM. O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela bolsa de Pesquisador-Visitante concedida (processo N°. 300929/96-0).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NEUBERT, H. *Estudo de tensões e cortes (Kerbspannungslehre)*. Editora: Springer, Berlin, 1985.
2. BLUMENAUER, H.; PUSCH, G. *Mecânica Técnica de Fratura (Technische Bruchmechanik)*. Editora: VEB Deutscher Verlag für Grundstofftechnik, Leipzig, 1982.
3. GRIFFITH, A. A. The Phenomena of Rupture and Flow of Solids. *Phil. Trans. Roy. Soc. A221*, p.163/198, London, 1920.
4. OROWAN, E. *Rep. Prog. Physics* 12, p. 185, 1949.
5. IRWIN, G.H. Fracture. Em: *Manual da Física*, Editor: S. Flügge, Vol. IV. Editora: Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1958, p. 551-590, 1958.
6. WEICHERT, R.; SCHÖNERT, K. Temperatura na ponta da fratura (Temperatur an der Bruchspitze), *J. Chem. Ing. Technik*, 48. ano, No. 6, p.543/544, 1976.
7. SCHNEIDER, F. U. Análises de difração de raios X à cominuição ultrafina de areia de quartzo e halito (Untersuchungen mit Hilfe der Röntgenbeugung zur Feinstzerkleinerung von Quarzsand und Steinsalz). *Aachener Blätter für Aufbereiten-Verkoken-Brikettieren* 1/2, p. 1/38, 1968.
8. SMEKAL, A. G. *International Symposium Reactivity of Solids*, Gothenburg, 1952.
9. GRIZINA, K. Análises da ativação por moagem de sólidos cristalinos sob consideração particular da cinética de solução de pentóxido de vanádio (Untersuchungen zur Mahlaktivierung kristalliner Feststoffe unter besonderer Berücksichtigung der Lösekinetik am Beispiel von Vanadiumpentoxid). *Tese de doutorado* na RWTH Aachen, 1978.

10. WEIBULL, W. Ingeniör Vetenskap Akademien Handlingar 153, 1939.
11. SCHÖNERT, K. Fundamentos da cominuição fina (Grundlagen zur Feinzerkleinerung). Chapter 1. *Preprints GVC* Dezembro-Tagung Köln, 1993.
12. HESS, W.; SCHÖNERT, K. Brittle Plastic Transition in Small Particles. *Proceedings D2/G1, PowTech Conference Particle Technology*, 1981
13. STEIER, K. A fratura de grãos de quartzo, calcário e poliestireno em função do tamanho e da estrutura na área 1 a 1000 μm (Die Korngrößenabhängigkeit des Bruchverhaltens und der Struktur druckbeanspruchter Körner aus Quarz, Kalkstein und Polystyrol im Bereich 1 bis 1000 μm). Tese de doutorado na Universidade Karlsruhe, 1971.
14. RUMPF, H.; SCHÖNERT, K. O aparecimento de fratura em esferas na deformação elástica e plástica provocada por esforços de pressão (Die Brucherscheinung in Kugeln bei der elastischen sowie plastischen Verformung durch Druckbeanspruchung). *Monografias DECHEMA*, Vol. 69, p.51/86, 1972.
15. SCHUBERT, H. (1974) *Tratamento de matéria prima mineral sólida (Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe)*. Vol. 1, Editora VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, p. 78, 1974.
16. HOFFMANN, N., SCHÖNERT, K. (1971): Partes fraturadas de esferas de vidro em camadas de frações e misturas binárias (Bruchanteil von Glaskugeln in Packungen von Fraktionen und binären Mischungen). *J. Aufbereitungstechnik* 12, p. 513/518, 1971.
17. FENTEN, N. Possibilidades e Limites da Geração de Produtos Ultrafinos (Möglichkeiten und Grenzen der Herstellung ultrafeiner Produkte). *Tese de doutorado* na RWTH Aachen, 1990.

18. WELLENKAMP, F.J. Desenvolvimento e Análise de um sistema novo para as moagens micro e ultrafina (Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mahlsystems für die Mikro- und Ultrafeinmahlung). Tese de doutorado na RWTH Aachen, 1996.
19. SEEBACH, v. H. M. O Efeito dos Vapores de Líquidos Orgânicos na Cominuição de Clinquer de Cimento em Moinhos Cilíndricos (Die Wirkung von Dämpfen organischer Flüssigkeiten bei der Zerkleinerung von Zementklinker in Trommelmühlen). *Schriftenreihe der Zementindustrie* Vol. 35, 1969.
20. IKAZAKI, F. et. al. Chemically assisted dry comminution of sericite - dry comminution method accompanied by ion-exchange. *National Institute of Materials and Chemical Research*, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan, 1995
21. KAMIYA, H.; JIMBO, G. Simulation of Aggregate Packing and Analysis of Aggregation Process of Ultrafine Powder and Particle, *J. KONA Powder and Particle* 10, p; 131/144, 1992.
22. SCHMIDT, K. H. Relevance of Sol-Gel Methods for Synthesis of Fine Particles. *J. KONA Powder and Particle* 14, p. 92/103, 1996.
23. MENDELOVICI, E. Mecanochemical Changes in Structure of MnO by Mixer-Mill Grinding, *Preprints 1st International Conference of Mecanochemistry*, Kosice May 23-26, 1992.
24. RYU, H.; KASAI, E.; KAZUMASA, S.; DAITO, F. Effect of Dry Co-Grinding a Mixed Powder by a Planetary Ball Mill on Formation of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ Superconducting Ceramics, *Preprints 1st International Conference of Mecanochemistry*, Kosice May 23-26, 1992.
25. KELLERWESSEL, H.; BLECKMANN, H. Equipamentos para Britagem Secundária e Moagem a Úmido de Materiais Minerais - Desenvolvimentos Novos (Feinbrech- und

- Nassmahlanlagen für mineralische Stoffe - neue Entwicklungen). Em: *Zerkleinerungstechnik*. Editor Pahl, M.H. Editora: TÜV Rheinland, Köln, 2a. edição, p. 173-188, 1993.
26. WEISS, N.L. (Editor) *Mineral Processing Handbook*. Editora: SME, p. 3C-119, 1985.
27. KURRER, K.E.; JENG, J.-J.; GOCK, E. Análise de Moinhos Vibratórios (Analyse von Rohrschwingmühlen). *VDI-Fortschrittsberichte*, série 3, No. 282,. Editora: VDI Verlag, Düsseldorf, 1992.
28. GRIZINA, K. e.a. O Moinho Centrifugal - uma Máquina Nova de Cominuição para Minérios e Materia Prima Mineral (Die Zentrifugalmühle, eine neuartige Zerkleinerungsmaschine für Erze und mineralische Rohstoffe). *J. Aufbereitungs-Technik*, p. 303/308, 1981.
29. SCHMIDT, P.; KÖRBER, R. Moinhos Planetários e vibratórios (Planeten- und Schwingmühlen). Em: *Zerkleinerungstechnik*. Editor Pahl, M.H. Editora: TÜV Rheinland, Köln, 2a. edição, p. 327-344, 1993.
30. STEHR, N.: Moinhos de Atrição (Rührwerksmühlen). Em: *Zerkleinerungstechnik*. Editor Pahl, M.H. Editora: TÜV Rheinland, Köln, 2a. edição, p. 283-316, 1993.
31. HIVELEY, E. E.; JONES, St. M. Ultrafine Grinding in a Tower Mill. Em: Ultrafine grinding and separation of industrial minerals. Editor: Malghan, S. G., chapter 7, SME, 1983.
32. SCHWEDES, J. Moinhos de Atrição (Rührwerksmühlen). *Preprints GVC Dezembertagung 1993*, chapter 7, GVC-VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 1993.
33. N.N. Patente DE-PS 34 31 636. Reibold und Strick GmbH & Co, 1984.

34. NIED, R.; HORLAMUS, H. Moinhos de Choque e a sua instalação (Prallmühlen und Prallmahanlagen). *Sprechsaal* 119 (7), p. 577-582, 1986.
35. NIED, R.: Moinhos de Rotor (Rotorprallmühlen). *Preprints GVC Dezembertagung 1993*, chapter 8, GVC-VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 1993.
36. RINK, N.; GIERSIEPEN, G. Análises Comparativas com Moinhos a Jato (Vergleichende Untersuchungen an Strahlmühlen). *Preprints* 4. Europ. Symposium Zerkleinern, Nürnberg, Vol. I, p. 387-402, 1975.
37. ULFINK, B., HEROLD, H.; BENZ, M. Moinhos a Jato (Strahlmühlen). *Preprints GVC Dezembertagung 1993*, chapter 9, GVC-VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 1993.
38. KERBER, A. Moagem dos Materiais Resistentes Carbetos de Silício e Corindon para Aplicações em Refratários, Abrasivos e Cerâmicas (Mahlung der Hartstoffe Siliciumcarbid und Korund für Feuerfest-, Schleifmittel- und Keramikanwendungen). *Preprints GVC Dezembertagung 1993*, chapter 12, GVC-VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 1993.
39. GRIMSHAW, V. C.; ALBUS, J. F. Fluid energy grinding and drying. *Preprints Ultrafine grinding and separation of industrial minerals*. Editor: Malghan, S. G., chapter 5, SME, New York, 1993.
40. VOLKER, W. ; HÖRSCHKES, S. Moagem Ultrafina de Materiais Consistentes (Feinstmahlen schwer verarbeitbarer Stoffe), *J. Verfahrenstechnik* 25 (4), p. 41-44, 1991.
41. WEISS, N.L. (Editor) *Mineral Processing Handbook*, SME, p. 3A-16, 1985.
42. SILLEM, H. Moinhos de rolos (Wälzmühlen). *Preprints GVC Dezembertagung 1993*, chapter 6, GVC-VDI Gesell-

- schaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 1993.
43. BRUNDIEK, H.: Moinhos de Rolos para a Moagem de Carvão em Termelétricas (Wälzmühlen zur Mahlung von Kohle in Kraftwerken). Em *Zerkleinerungstechnik*. Editor Pahl, M.H., TÜV Verlag, Köln, p. 52-88, 1993.
 44. SCHÖNERT, K. Metodo para a cominuição fina e ultrafina de materiais quebradiços (Verfahren zur Fein- und Feinstzerkleinerung von Materialien spröden Stoffverhaltens). *Patente* DP 2708053, 1979.
 45. PIETSCH, W. Roller Presses - Versatile Equipment for Mineral Processing. *Preprints XIX IMPC San Francisco, USA*, chapter 9, 1995.
 46. MÖRSKY, P.; KLEMETTI, M; KNUUTINEN, T. A comparison of high pressure roller mill and conventional grinding. *Preprints XIX IMPC San Francisco, USA*, chapter 8, 1995.
 47. SCHWECHTEN, D. Moinhos de Rolos de Alta Pressão (Gutbett-Walzenmühlen). *Preprints GVC Dezembertagung 1993*, chapter 3, GVC-VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 1993.
 48. KELLERWESSEL, H. Cominuição de Matéria-prima Mineral com Moinhos de Rolos de Alta Pressão (Hochdruck-Gutbett-Zerkleinerung von mineralischen Rohstoffen). *J. Aufbereitungstechnik* 34 (5), p. 243-249, 1993.
 49. SCHWECHTEN, D.; MILBURN, G. H. Experiences in Dry Grinding with High Compression Roller Mills for End Product Quality below 20 μ m. *J. Minerals Engineering*, Vol. 3, No. 1/2, p. 23-34, 1990.
 50. SCHÄFER, R.; SCHRÖER, H. Moagem Fina de Minerais Industriais (Feinmahlung von Industriemineralien). *Preprints GVC Dezembertagung 1993*, chapter 11, GVC-VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 1993.

51. THURAT, B.; WOLTER, A. Moagem Fina de Clínquer, Carvão e Calcário com o Moinho de Rolos de Alta Pressão (Gutbett-Walzenmühle zur Feinmahlung von Rohmehl, Kohle, und Kalk). *J. Zement Kalk Gips* (42), p. 179/183, 1989.

EXTENDED ABSTRACT

Fine grinding is one of the most important, but most energy intensive operations in mineral industry. For this reason much research was done to reduce the energy consumption of grinding processes in the last decades. As a by-product of these activities the fundamentals of comminution were illuminated, allowing a better understanding of particle fracture. Based on this, significant progresses were made in grinding practice. Optimization of the traditional ball, vibration and impact mills took place and new mill types were invented. Another research aim was the extension of the grinding limits to finer product sizes until the submicrometer range and the processing of superfine materials. These superfine materials are used in various industries, like paper, chemical, paint, plastic or ceramic industry. In these applications the products generated by grinding compete directly with those generated by wet chemical processing. Indeed, the chemical products show a higher degree of pureness, but their production is more expensive. On account of the costs, the ultrafine ground products are substituting those generated by wet chemistry ever if it is possible.

Fine and ultrafine grinding can be conducted in media, impact and roller mills. Beyond the media mills for fine grinding, the traditional ball mill has the greatest importance in terms of worldwide throughput rates still today. Grinding of ores for mineral liberation and of cement clinker are the dominant applications of ball mills. The energy efficiency of ball mill circuits were augmented in the past. The division of the grind chamber in compartments allowed to adequate the media size to the size of the material passing through the mill. By operating the mills in closed circuit with classifiers further energy savings were obtained and 'overmilling' of fine particles was avoided. Actually, there is a tendency to elevate the performance of ball mill circuits by combining them with high pressure roller mills. Ultrafine grinding is rarely conducted with ball mills. The stressing

conditions for finest particles are not adequate, resulting in very small throughput rates.

The main working field of vibratory mills is the fine grinding of abrasive and hard materials. For this tasks vibratory mills with throughput rates up to 20-40 t/h are applied. Some new features of vibration mills were invented in the past. A so called 'chamber wheel' was developed which homogenizes the spacial energy distribution of the grinding media. The propulsion of the mill with an unbalanced system increases the energy of the grinding media up to levels sufficient for ultrafine grinding. Ultrafine grinding can also be conducted in vibratory mills with vertical vessels and centrifugal mills. In the latter, oscillation of the vessel with greater amplitudes and frequencies than in conventional vibratory mills is possible. Planetary mills are very abundant in the field of sample preparation in laboratory scale. In this mills small amounts of material can be exposed to intensive stressing, for example, to study the potential of mechanical alloying.

Since in high speed attrition mills the micronization of medium hard minerals can be conducted with relative small amount of energy, their importance for the mineral industry increased over the last years. Recently, attrition mills were fitted for ultrafine grinding of ceramic and abrasive raw materials. In these applications the mill vessels and rotors have to be protected with refractory materials.

Impact mills used for fine and ultrafine grinding are rotor and fluid energy mills. Various companies are offering rotor mills in a broad variety of models. All these are adequate for fine dry grinding of medium hard, not abrasive materials. Ultrafine grinding can be conducted in rotor mills, if they are coupled with a wheel classifier. Fluid energy mills are certainly the most versatile equipment between the impact mills. They are adequate for contamination free fine and ultrafine grinding of soft to very hard and abrasive materials. Cryogenic processing of thermo sensitive materials is possible. But on account of high energy consumption, fluid energy grinding should be taken only into

consideration, if size reduction in other mill types, like rotor or attrition mills is not feasible.

Two groups of roller mills are worth to be mentioned at this place: roller mills with working table and high pressure roller mills. Roller mills with working table, like Raymond pendulum mills, are already known since the beginning of this century, and are still adequate for fine grinding of materials with medium resistance to fragmentation, like coal, limestone, clay etc. Since the first pendulum mills, new roller systems were invented and approved in practice. In modern mills, instead of the rollers, the working table is turned around. This permits a stationary arrangement of the rollers and a individual adjustment of the grinding forces by a spring or hydraulic system. Thus, in analogy with high pressure roller mills, particle break down by pressure stressing of material layers is possible. In high pressure roller mills a particle bed is submitted to intensive stressing by pressure forces. This results in compactation, making a dispersion step necessary. Dispersion can be conducted in ball or impact mills. In both cases, significant energy savings in comparison with conventional ball milling are gained. This was firstly observed in the cement industry, where the partial costs of grinding are determinants for the price of the product. In the mining industry the diffusion of high pressure roller mills is not that broad than in the minerals industry. However, applications are found for fine grinding of diamond, iron and cromite ores. Despite of ultrafine particles can be generated in high pressure roller mills with little amount of energy, they are yet not used for this purpose in industrial scale. Technical problems related to the feeding of fine particulated materials are the reason for this.