

**MICRONIZAÇÃO EM MOINHO COM JATO DE AR EM ESPIRAL**T.M. LONDE^{1*}, J.R.D. FINZER²,¹Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química²Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química*e-mail: tales.martins@hotmail.com, jrdfinzer@pq.cnpq.br

RESUMO - A micronização ou moagem fina e ultrafina é uma operação unitária que visa reduzir o tamanho de partículas por meio de aplicação de forças mecânicas, como impacto, atrito e compressão, sendo fundamental na indústria para o beneficiamento de materiais, ou até mesmo como mecanismo para acelerar rendimentos, e adequar produtos. Os processos de moagem requerem conhecimento dos princípios de fragmentação das partículas e de seus mecanismos de fraturas, assim como o conhecimento das características físicas das partículas para escolha correta dos equipamentos utilizados nos processos de moagem. O presente trabalho traz uma abordagem destes conceitos, e foca no princípio de funcionamento do moinho a jato de ar em espiral (*Spiral air Jet Mills*), que faz a fragmentação das partículas através de impacto entre as mesmas. O estudo em particular relatado neste trabalho é a influência da alimentação, no processo de moagem de agalmatolito, e um estudo das características físicas das partículas no final do processo, avaliando sua granulometria, área de superfície específica e diâmetro médio de Sauter, da amostra antes do processo de micronização e dos produtos finais após o processo. O tamanho $d(0,9)$, para a amostra foi de 161,8 μm e dos produtos variou de 22,3 a 65,2 μm . A superfície específica da amostra foi de 0,35 m^2/g e as dos produtos variaram de 0,57 a 1,23 m^2/g . O diâmetro médio de Sauter da amostra de foi 17,1 μm e dos produtos variaram de 4,9 a 10,6 μm .

INTRODUÇÃO

A micronização é o termo que pode ser utilizado para englobar a moagem fina e ultrafina de materiais. A moagem fina menor que 100 μm é uma das mais importantes operações na indústria mineral e se caracteriza por altos consumos de energia elétrica. Por esta razão, muitos trabalhos de pesquisa foram realizados nas últimas décadas visando à redução do consumo de energia da moagem. Em paralelo com esses esforços, os fundamentos da fragmentação foram esclarecidos, conduzindo a uma melhor compreensão dos processos de fratura das partículas, e também conhecimento da

influência das características físicas do material nos processos de moagem.

Assim progressos significativos na prática de moagem foram obtidos, como a otimização de moinhos, que operam por mecanismos de cisalhamento, compressão, impacto, dentre outros, juntamente com o desenvolvimento de novos modelos de moinhos e sistemas de moagem, possibilitando à extensão dos limites de moagem a menores tamanhos de partículas até faixas de materiais ultrafinos, menores que 10 μm (WELLENKAMP, 1999).

Embora técnicas avançadas de moagens fina e ultrafina já sejam aplicadas industrialmente no beneficiamento de

materiais, o bom conhecimento destas técnicas é fundamental para suas aplicações, deste modo o presente trabalho inclui uma revisão sobre temas principais para o conhecimento do tema, relatando: como o tamanho da partícula influencia diretamente em alguns métodos; como e porque ocorre a fragmentação das partículas; como as características físicas dos materiais estão relacionados aos seus mecanismos de fragmentação e a importância de conhecê-los; quais as principais técnicas de moagem e como funcionam; os aspectos energéticos envolvidos na moagem; e uma descrição dos princípios de funcionamento dos principais equipamento de moagem empregados nas indústrias de minérios, química, farmacêutica e cerâmica.

O presente estudo realiza um enfoque principal nos moinhos de impacto por jatos (*air jet mills*) com um detalhamento no modelo espiral utilizado para realização de ensaios de micronização. Os ensaios foram realizados com agalmatolito, sendo o material alimentado em diversas taxas no equipamento, o qual operou a pressões constantes, para que fosse possível analisar a influência direta da alimentação no tamanho de partícula do produto final.

OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo descrever o processo de micronização de partículas, a relevância, os mecanismos da fragmentação, a influência das características físicas do material, e um estudo da influência da vazão de alimentação no tamanho final de partícula do produto em um moinho de ar comprimido (*air jet mills*).

CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A importância e influência do tamanho de partícula

Antunes (2007) cita que, a produção de partículas pequenas com distribuição de tamanho controlada tem atraído o interesse da comunidade científica e industrial com aplicações nas indústrias farmacêutica, alimentar e química. O tamanho da partícula influencia diretamente vários processos, como

a combustão de explosivos sólidos, onde as partículas menores geram uma maior energia de detonação, a eficiência de coloração dos pigmentos pode ser aumentada quando o material corante é aplicado sob a forma de partículas muito pequenas; ou a atividade dos catalisadores, que está também associada a elevadas áreas superficiais, que podem tipicamente ser obtidas através do uso de nano partículas. As micro partículas de polímeros podem também ser usadas como fase estacionária em cromatografia.

Conceitos de fragmentação das partículas

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 inter atômicas. 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 muitos plásticos as deformações são denominadas de visco-elásticas, e em aços, elástico-plásticas (NEUBERT, 1985)

Um dos processos para redução de tamanho de partículas é a fragmentação, que tem como resultado a formação de fragmentos de diferentes tamanhos e de forma irregular. A ruptura é provocada por elevações de tensões em falhas da estrutura cristalina. A partícula fragmenta quando as elevações de tensões nas extremidades das falhas atingem um nível crítico, iniciando-se a sua propagação. (BLUMENAUER, 1982).

Esses conceitos explicam que deformações em materiais quebradiços, 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.

Apesar das teorias de fragmentação assumirem que o material é frágil, os cristais

podem armazenar energia sem se fragmentarem e liberar esta energia quando a ação do esforço é suprimida. Essa propriedade é conhecida como elasticidade. Quando ocorre fratura, parte da energia estocada transforma-se em energia livre de superfície, que é uma energia potencial dos átomos da nova superfície formada. Devido a esse aumento de energia, as superfícies, quando recém-formadas, são quimicamente mais ativas e, portanto, mais adequadas à ação dos reagentes de flotação, como também se oxidam mais facilmente (FIGUEIRA; 2004).

A influência das características físicas da matéria-prima

Carvalho (2012) diz que as características físicas da matéria-prima a ser processada são informações de grande importância a serem avaliadas no processo de cominuição, e algumas delas são expostas a seguir:

Dureza: A dureza representa a resistência que uma superfície oferece quando atritada à outra e depende de sua estrutura. Materiais definidos como duros (que riscam outros materiais) são resistentes à abrasão e podem ser também quebradiços, como o caso do diamante, do quartzo e até mesmo do vidro (GALERY, 2011). Um dos principais índices de dureza do material utilizado é a escala de Mohs, na qual são atribuídos valores de 1 a 10, sendo o valor de 1 dado ao material menos duro, representado pelo talco, e o valor 10 dado ao material mais duro conhecido na natureza, o diamante. Esta escala não corresponde à dureza absoluta de um material.

Tenacidade: O termo tenacidade é conhecido como sendo a resistência ao rompimento por tração, compressão ou impacto. É uma medida da quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar. Vários termos são utilizados como sinônimos ou associados à definição de tenacidade: frível (frágil, quebradiço), maleável, séctil, dúctil, flexível e elástico. Os dois termos, dureza e tenacidade, de uma maneira ou de outra correspondem à forma que os bens minerais respondem às forças de fragmentação a que são submetidos (GALERY, 2011).

Abrasividade: A abrasividade corresponde à capacidade que um material possui de arranhar ou desgastar, por fricção, outro material. Normalmente pode ser descrita através do conteúdo de sílica e quartzo livre, relacionado com o índice de abrasão (Ia). A abrasividade deve ser analisada com a finalidade de se evitar altos custos de manutenção. A seguir são explicitados os limites de abrasividade (METSU, 2005). Abrasividade Alta: Índices de abrasão acima de 0,5 (ex.: granito, quartzito); Abrasividade média: índices de abrasão de 0,2 a 0,4 (ex.: diabásio e basalto); Não Abrasivo: índices de abrasão menores que 0,1 (ex.: calcários e dolomitas).

Coesão: A fragmentação das partículas se dá pelo rompimento das forças de coesão ao longo das superfícies que se formam. Isso implica no fornecimento de certa quantidade de energia de fragmentação que tem que ser proporcional à energia de coesão interna. O resultado do processo de fratura é uma distribuição de fragmentos menores. A distribuição característica do produto de fragmentação depende não só da natureza das forças de coesão interna das partículas como também da forma de energia e da intensidade com que elas foram aplicadas sobre a partícula (GALERY, 2011).

Resistência à compressão: A ação das forças de compressão provoca a deformação da partícula gerando tensões internas de cisalhamento. Essas tensões de cisalhamento se distribuem pelo grão concentrando-se principalmente nas regiões de maior fraqueza estrutural. Nas partículas, as principais regiões de fraqueza estrutural são as trincas pré-existentes ou pré-condicionadas em algum processo de fragmentação anterior. A tensão que provoca a ruptura da partícula concentra-se na extremidade da trinca. Nesse ponto, as ligações químicas se encontram sob tensão máxima. Quando a tensão supera as energias de ligação química, as mesmas se rompem e a trinca se propaga de forma acelerada e desordenada. Após a ruptura e uma vez cessada a causa da deformação, os fragmentos resultantes retornam a sua forma de equilíbrio (GALERY, 2011).

Velocidade de propagação de onda:

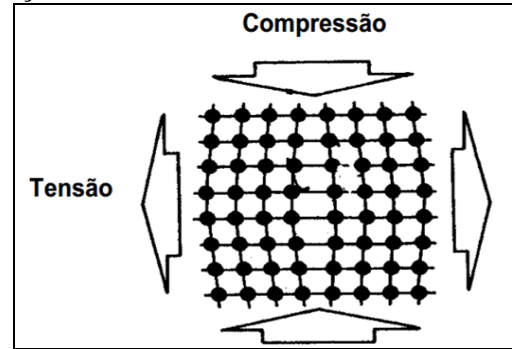
Dependendo da intensidade da energia aplicada, as partículas não têm condições de dissipar imediatamente toda a energia absorvida e distribuem a mesma para um número muito grande de trincas, podendo ocorrer propagação da trinca com ramificações sucessivas e ruptura em diversos fragmentos. Quando a energia for de impacto de alta intensidade, a propagação da trinca atinge a velocidade máxima. Mesmo que forças compressivas não consigam gerar forças de cisalhamento capazes de provocar fratura, os reflexos das ondas compressivas provocadas por uma região não solicitada da partícula podem gerar tracionamento suficiente para causar ruptura nas trincas presentes no material que se propagam em ramificações sucessivas. A condição de impacto envolve a propagação da onda de choque e provoca ramificação da trinca em alta velocidade. Esse processo ocorre de forma aleatória e desordenada (GALERY, 2011).

Os mecanismos de fragmentação de partículas sólidas

Os mecanismos de fragmentação são bastante variados devido à enorme variedade estrutural de materiais sólidos e os diferentes graus de finura desejados. Todos eles, contudo, se dão a partir da aplicação de um esforço que cause inicialmente o aparecimento de fissuras no material. Em seguida, a concentração de esforço adquire um valor crítico, isto é, quando se rompem todas as ligações atômicas de um certo plano acarretando um rápido crescimento e ramificação das fissuras, ocorrendo finalmente a ruptura do material, que pode ser devido a forças externas. Estas forças podem ser geradas por cargas de tensão ou de compressão, como mostra a Figura 1.

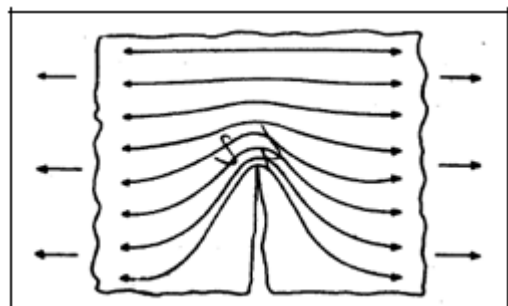
Um material ideal se rompe quando o limite de ruptura é ultrapassado. Isto é, quando se rompem todas as ligações atômicas de certo plano. Isso não ocorre facilmente com as rochas e os minerais, pois eles são materiais heterogêneos, anisotrópicos e contém falhas, fraturas, tanto em escala micro como macroscópica (FIGUEIRA; 2004).

Figura 1: Exemplo de rompimento do material por forças externas:



No campo da ciência dos materiais, as falhas microscópicas denominam-se deslocamentos e em mecânica de rochas, "gretas de *Griffith*". A existência dessas falhas nos materiais explica sua baixa resistência mecânica. A teoria da fratura estuda a formação de gretas a partir de falhas e sua propagação no sólido. Mesmo quando as partículas são sujeitas as forças uniformes, as pressões internas não são igualmente distribuídas, pois as rochas se constituem de uma variedade de minerais dispersos com grãos de vários tamanhos. A distribuição da força depende, não só das propriedades mecânicas de cada mineral, mas principalmente da presença de gretas e falhas no corpo mineral que podem ser observadas na Figura 2 que agem como sítios de concentração de forças. (FIGUEIRA; 2004).

Figura 2: Concentração de esforços numa fenda.

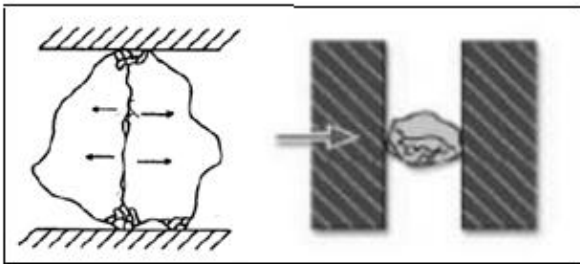


A fragmentação de partículas sólidas pode ocorrer industrialmente por maneiras distintas, dependendo do tipo do material e da finura final necessária. São elas:

1) Compressão ou esmagamento: A fragmentação por compressão envolve uma tensão que é aplicada entre duas superfícies

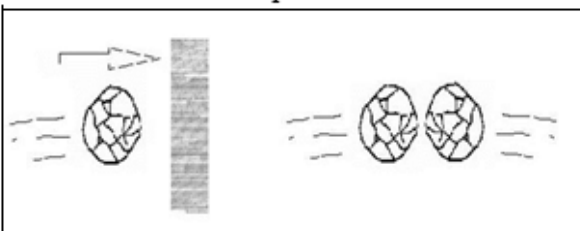
sólidas que podem mover-se uma em relação à outra frontal ou tangencialmente para exercer a pressão necessária. A fragmentação ocorre quando a força é aplicada de forma lenta e permite que, com o aparecimento da fratura, o esforço seja aliviado. Assim, a força é pouco superior à resistência da partícula. Quando partículas de formato irregular são sujeitas à quebra por compressão, os produtos se apresentam em duas faixas de tamanho: partículas grossas resultante da quebra induzida pela tensão, e partículas finas da quebra por compressão no local onde a carga é aplicada, como mostra a Figura 3 (BERALDO; 1987)

Figura 3: Fragmentação da partícula por compressão.



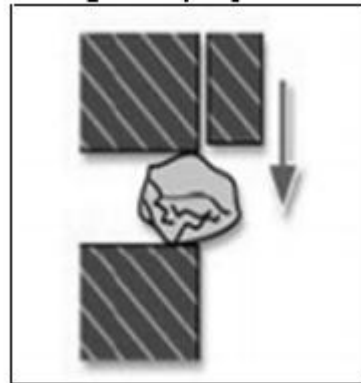
2) Choque ou impacto: A fragmentação por impacto envolve uma tensão em uma superfície sólida que pode ser efetuada pelo choque com partes do equipamento de cominuição ou entre partículas como mostra a Figura 4 (neste caso provocado pela alteração da energia cinética relativa). A fratura ocorre quando forças são aplicadas de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência das partículas. Resulta deste tipo de quebra um grande número de partículas em uma vasta faixa granulométrica.

Figura 4: Fragmentação da partícula por impacto.



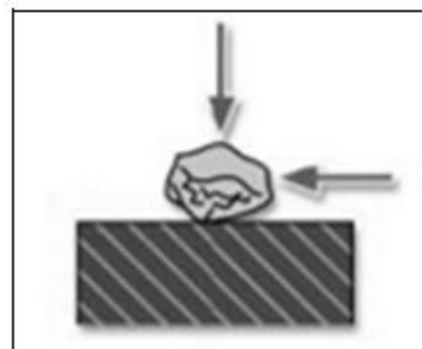
3) Cisalhamento: A fragmentação por cisalhamento envolve uma tensão entre duas ou mais superfícies sólidas como resultado de uma força de cisalhamento. A diminuição granulométrica é iniciada pelo movimento das duas superfícies se movendo em direções opostas ou por uma superfície móvel e outra fixa como pode ser visto na figura 5.

Figura 5: Fragmentação por cisalhamento.



4) Atrito: A fragmentação por atrito e muitas vezes acompanhada também por compressão. Neste mecanismo, a tensão entre duas superfícies sólidas é provocada por uma pressão vertical em um lado e pelo movimento circular ou não circular em outra sobre a superfície como mostra a figura 6 a seguir.

Figura 6: Fragmentação da partícula por atrito.



Conceitos de eficiência de moagem

Em circuitos de moagem industrial, um dos pontos primordiais é a busca pela eficiência de moagem, com diversos objetivos, como: Redução no desgaste de corpos moedores; Diminuição do consumo de energia; Redução dos custos operacionais; Aumento da quantidade de material liberado.

Sabe-se que os conceitos mais tradicionais de eficiência de moagem estão ligados ao consumo de energia e granulometria do produto, deste modo pode-se definir como eficiência de um circuito de moagem a razão entre a energia consumida e a vazão mássica de produto moído em determinada granulometria (ROSA, 2013).

Aspectos energéticos da fragmentação

Nos equipamentos de fragmentação industrial, onde milhares de partículas estão presentes, a redução de tamanho não é um fenômeno isolado. O conhecimento das relações de energia nesses equipamentos constitui preocupação constante, já que é o ponto mais oneroso em uma instalação industrial. Além disso, grande parte da energia disponível é dissipada (através de deformação, atrito, ruído) restando apenas uma fração da energia transferida à fragmentação propriamente dita. Até hoje não foi possível isolar e quantificar as diferentes parcelas de energia presentes no processo de fragmentação. Tem sido preferível correlacioná-las, todas num único índice que, de preferência, faça referência às dimensões das partículas minerais. Nesta linha, alguns pesquisadores apresentaram contribuições significantes. (GALLERY, 2011).

Lei de Rittinger: "O trabalho necessário para realizar a fragmentação é proporcional à área nova da superfície gerada" e é dada pela equação 1:

$$E = K (S_1 - S_0) \quad (1)$$

sendo: E = energia específica aplicada; K = coeficiente de proporcionalidade; é função das características do material, ou seja a dificuldade a quebra; S₁ = área da superfície do produto; S₀ = área da superfície inicial.

Esta lei se aplica à fragmentação muito fina como, por exemplo, a moagem de clínquer de cimento.

Lei de Kick: "O trabalho requerido é proporcional à redução em volume das partículas envolvidas". A expressão da lei é dada pela Equação 2:

$$E = C \log \frac{D_0}{D_1} \quad (2)$$

sendo: C = constante; D₀ = diâmetro inicial; D₁ = diâmetro final.

Lei de Bond: Bond postulou uma lei empírica muitas vezes chamada de "3ª Lei de Fragmentação". "A energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho". Ele definiu como tamanho, a abertura da peneira pela qual passam 80% do material. A expressão da Lei de Bond (Equação 3) é a seguinte:

$$E = E_0 \left[\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right] \quad (3)$$

sendo: P = tamanho do produto; F = tamanho da alimentação; E₀ = constante.

Figueira (2004) explica que Bond propôs o uso de um índice conhecido como Wi (*Work Index*) ou índice de trabalho, que é definido como o trabalho necessário para reduzir a unidade de peso (tonelada curta = 907 kg) do material considerado, desde um tamanho inicial teoricamente infinito (F = ∞), até uma granulometria 80% passante em 100 μm. A aplicação da equação de Bond no cálculo da energia consumida numa instalação de moagem se difundiu, e a determinação experimental do Wi é hoje uma prática normal em muitos laboratórios.

A micronização ou moagem fina e ultrafina

A moagem é uma operação unitária que visa reduzir o tamanho da partícula e pode ser subdividida em várias classes de acordo com o tamanho da partícula necessário/desejado. Seja na área dos agroquímicos, farmacêuticos, ou a indústria química em geral, periodicamente, a indústria demanda de partículas cada vez menores, chegando a atingir a escala dos nanômetros, que se mantém incluído no termo micronização. A Micronização é o termo generalizado para descrever a redução de tamanhos das partículas obtidas por sistemas moagem tradicionais, podendo ser classificada como moagem fina, quando a granulometria é menor que 100 μm, e ultrafina, menor que 10 μm. Para isso são usados diferentes tipos de equipamentos. Os moinhos 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 ou úmido (ANTUNES, 2007 e WELLENKAMP, 1999).

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. 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 (WELLENKAMP, 1999).

O material micronizado

O agalmatolito é uma rocha metamórfica resultante da alteração hidrotermal da rocha-mãe, é constituído principalmente por dois minerais, a pirofilita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e moscovita ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), e pode ocorrer em associação com diversos minerais como: sericita (uma variedade de moscovita, finamente cristalizada), quartzo, cianita, andaluzita, diásporo e feldspato. Portanto dependendo de sua mineralogia, o agalmatolito pode apresentar cor branca, creme, cinza, esverdeada e roxa (LUZ; TOMEDI; MARTINS, 2005).

Segundo Secco (2009) e Sena (2007) os agalmatolitos possuem atributos químicos, físicos e mineralógicos que os tornam excelentes materiais de uso industrial. A maior parte da produção obtida destina-se às indústrias de produtos minerais não metálicos, como: Refratários, Tintas, Plásticos, Cerâmicas, Borrachas e elastômeros, Sabões, Cosméticos, Agroquímicos, dentre outros.

MATERIAIS E MÉTODOS

O Moinho a jato de ar espiral

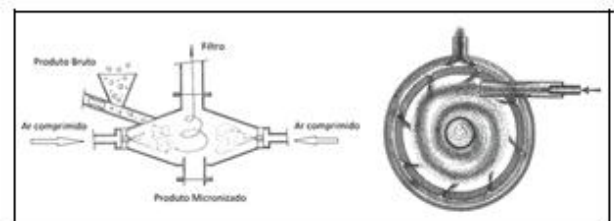
O equipamento utilizado no experimento é um moinho a jato de ar espiral, do modelo MS200P fabricado pela empresa Micro Service. Uma imagem do equipamento pode ser vista na Figura 7.

Figura 7: Micronizador a jato tipo espiral.



O moinho de jacto em espiral é apropriado para a redução do tamanho de partículas de materiais que apresentam características de moagem cristalina e quebradiça. É utilizado em aplicações onde uma fração ultrafina é necessária. O moinho de jatos em espiral tem um *design* visto na Figura 8 consistindo em uma câmara de moagem cilíndrica plana com vários bicos dispostos tangencialmente na parede periférica, um injetor de alimentação pneumático, e um funil de alimentação (JOSHI, 2011).

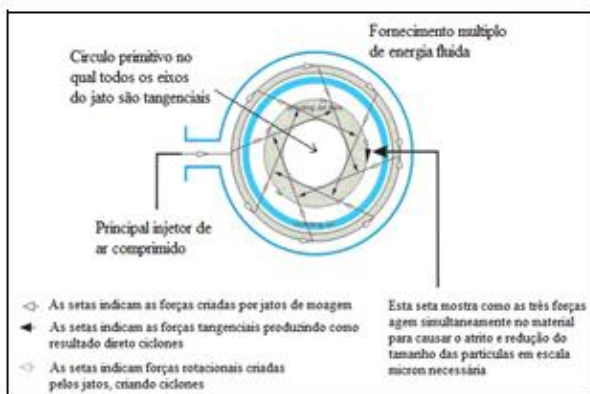
Figura 8: Princípio de funcionamento do moinho a jato espiral.



O material é alimentado para o interior da câmara de moagem através de um funil colocado em inclinação apropriada sobre a tampa da câmara de moagem. No fundo do funil um bico injetor acelera bruscamente as partículas para dentro da câmara através da abertura da alimentação da câmara que por sua vez é equipada com um venturi. Fluxos de ar

comprimido são injetados a alta velocidade através de bocais localizados na periferia da câmara circular do moinho. Então o material dentro da câmara de moagem é submetido a duas forças, o vórtice livre criado por força centrífuga ao acelerar as partículas tangencialmente, pelo bico injetor de alimentação, e as forças de arraste criadas pelo escoamento de ar dos bicos injetores nas laterais da câmara (Figura 9) que leva a partícula a entrar em contato várias vezes umas com as outras, gerando a redução progressiva do diâmetro e da massa. A medida que as partículas tornam-se mais finas, a força de arrasto exerce efeitos maiores, transportando as partículas com a corrente de ar para a região central do equipamento onde fica localizada a saída, a combinação destas forças gera efeito ciclone, a força da gravidade juntamente com a desaceleração das partículas faz com que elas sejam separadas no recipiente coletor no fundo do equipamento, e o ar escoar para a saída superior onde está localizado o filtro (NUOVA GUSEO, 2013 e WANG; FORSSBERG, 2005).

Figura 9: Exemplo de comportamento das partículas dentro do equipamento de moagem.



As variáveis do processo

1º Alimentação: Uma variável de extrema importância na granulometria do produto final é a vazão de alimentação, bem como a uniformidade da granulometria das partículas e características do produto. Como as características geométricas do equipamento são fixas, o volume da câmara de micronização é constante, e mantendo-se a pressão do equipamento também constante, a variável de alimentação influenciará

diretamente o produto final. Com uma redução na alimentação, o volume disponível para a expansão do produto no interior da câmara fica cada vez maior, aumentando assim a relação de fluido motriz (ar comprimido) versus kg/h de material processado, havendo assim um maior aproveitamento da energia potencial do fluido o que acarreta em uma maior quantidade de choque entre as partículas reduzindo sua granulometria, da mesma forma o aumento da alimentação reduzirá o espaço de expansão diminuindo a quantidade de choques, e não reduzindo de forma satisfatória a granulometria do produto. Um ponto importante é de que redução da vazão de alimentação do material processado é limitada a certa quantidade, onde uma baixa alimentação não terá quantidade de choques entre as partículas suficientes para a redução da granulometria, passando a haver nessas condições, a não redução da granulometria, ou em certos casos dependendo do material até um possível aumento da granulometria devido à aglomeração de algumas partículas (MICRO SERVICE, 2012 e JOSHI, 2011).

2º As pressões: O princípio de operação do micronizador é transformar a energia potencial do fluido motriz (ar comprimido) em energia cinética utilizada para provocar o choque entre as partículas, desta forma quanto maior for a pressão, maior será a velocidade final dos jatos, assim transmitindo maior energia para as partículas resultando em choques mais energéticos gerando uma melhor redução na granulometria do material. Micro Service (2012) estipula que para seu equipamento operando em uma pressão de 7 Kgf/cm² a velocidade dos jatos é de aproximadamente 500 m/s, e que o aumento da pressão a partir deste ponto gera alterações pouco significativas na qualidade final, uma vez em que o aumento da pressão para 15 kgf/cm² gera um incremento na velocidade final dos jatos de apenas 30 m/s não alterando significativamente o produto final. Desta forma tomando-se como base a homogeneidade na qualidade final do produto, não se justifica a utilização de pressões maiores que 7 Kgf/cm², pois geraria um consumo maior de energia sem alteração na qualidade do produto.

Análise granulométrica

As análises de tamanho de partículas foram realizadas nesse experimento através do equipamento Mastersizer 2000 – Malvern®.

O equipamento utiliza a técnica de difração laser para medir o tamanho das partículas. Para isso, ele mede a intensidade da luz espalhada à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra. Esses dados são então analisados para calcular a distribuição do tamanho das partículas obtidas a partir do padrão de espalhamento gerado (MALVERN, 2014).

O experimento

O experimento realizado consiste na micronização de amostras de agalmatolito no equipamento Micronizador MS200P, o experimento foi realizado da seguinte forma:

Inicialmente foi realizada a análise granulométrica do produto no equipamento Mastersizer 2000 para determinar o tamanho de partícula inicial do material antes da micronização.

Para a moagem foram fixados os valores de pressão do equipamento em 5 Kgf/cm² no bico injetor de alimentação, e 3,5 Kgf/cm² na câmara de moagem.

Foram realizados os ensaios de moagem variando então a vazão de alimentação do produto para analisar a influência da alimentação no produto final, uma vez que as pressões de trabalho foram mantidas constantes. As vazões selecionadas para o experimento foram de:

10 kg/h de produto, sendo essa a taxa de alimentação máxima indicada pelo fabricante para bom funcionamento do equipamento.

1 kg/h de produto, sendo que essa taxa representa 10 % da vazão máxima realizada no experimento.

As demais vazões em que o experimento foi realizado foram as de 3 kg/h, 5 kg/h e 7,5 kg/h, por serem esses valores intermediários aos dois valores selecionados para vazão máxima e mínima.

Após a realização de todos os ensaios as amostras foram novamente submetidas a análises do tamanho de partículas para

quantificar a influência da alimentação na granulometria do produto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para organização do experimento, os materiais foram identificados da seguinte forma: Amostra: O material não micronizado, utilizado como base do experimento; Produto 1: O material micronizado a vazão de 1 kg/h; Produto 2: O material micronizado a vazão de 3 kg/h; Produto 3: O material micronizado a vazão de 5 kg/h; Produto 4: O material micronizado a vazão de 7,5 kg/h; Produto 5: O material micronizado a vazão de 10 kg/h

Para realização do experimento foi inicialmente quantificado o tamanho das partículas da amostra inicial, e verificou-se que $d(0.9)$ (diâmetro tal que 90% do volume do material é constituído de partículas menores que esse valor) da amostras correspondeu a 161,8 μm (obtido com o uso do Mastersizer). Usando amostra com esse diâmetro foram realizados os ensaios de micronização.

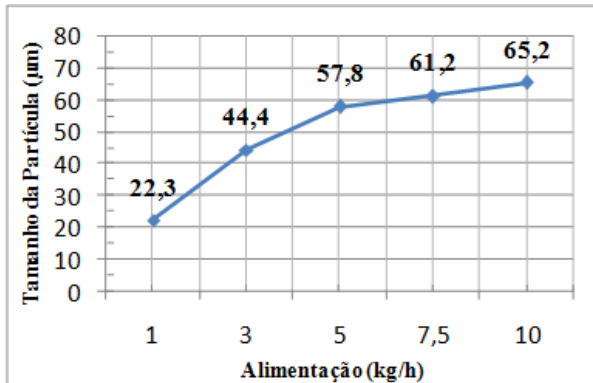
Após os ensaios de micronização foram realizadas as análises para obtenção do tamanho de partícula das amostras, sendo os resultados mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados obtidos após os ensaios.

Material	Alimentação (Kg/h)	Tamanho de Partícula (μm)	Superfície específica (m^2/g)	Diâmetro Médio de Sauter (μm)
Produto 1	1 kg/h	22,3	1,23	4,9
Produto 2	3 kg/h	44,4	0,82	7,4
Produto 3	5 kg/h	57,8	0,64	9,4
Produto 4	7,5 kg/h	61,2	0,61	9,8
Produto 5	10 kg/h	65,2	0,57	10,6
Amostra	Não micronizado	161,8	0,35	17,1

Analisando os resultados obtidos pode-se concluir que a alimentação influencia no tamanho final do produto, e quanto menor a vazão de alimentação menor o tamanho final da partícula. Pode-se constatar que a relação entre alimentação e tamanho de partícula final não ocorre linearmente como se pode observar na Figura 10.

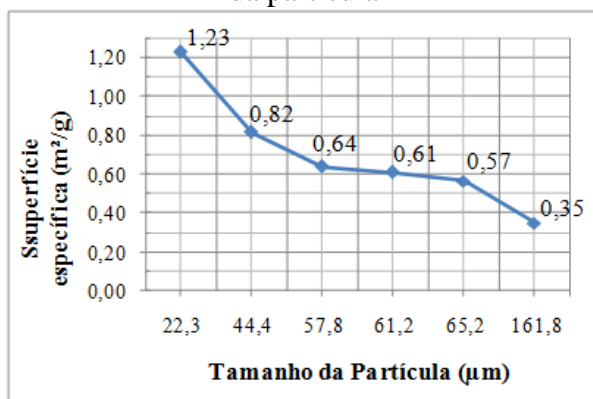
Figura 10: Relação do tamanho de partícula final pela vazão de alimentação



Uma variável de igual importância ao tamanho da partícula é a área da superfície específica, grandeza que influencia diretamente em processos, como a velocidade em uma reação química, tempo de ação de uma droga farmacêutica, ou absorção de uma molécula química, como no caso dos defensivos agrícolas. A Tabela 1 citada anteriormente relaciona as grandezas do tamanho de partícula e superfície específica.

Como se pode constatar na Figura 11, o tamanho da partícula e a área de superfície específica são grandezas inversamente proporcionais, portanto, quanto menor o tamanho da partícula maior a superfície específica.

Figura 11: Superfície específica por tamanho da partícula

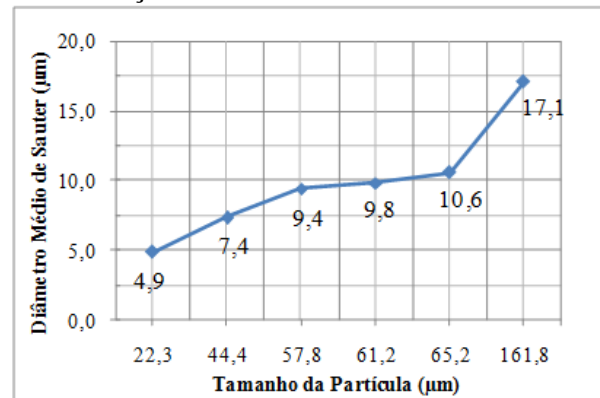


O diâmetro médio da superfície das partículas, (D_s) também conhecido como diâmetro médio de Sauter [D32], é um dos diâmetros médios mais importante, pois é diretamente relacionado com a área superficial por unidade de volume, e com a fração volumétrica da fase dispersa. Para os

experimentos foram encontrados os cujo estão resultados expressos na Tabela 1.

O Diâmetro Médio de Sauter é determinado como diâmetro da partícula cuja relação superfície/volume é a mesma para todas as partículas, portanto os resultados onde a distribuição granulométrica apresentou maiores partículas tendem a ter um diâmetro médio de Sauter maior, como se pode observar na Figura 12.

Figura 12: Diâmetro Médio de Sauter em função de cada Tamanho de Partícula



CONCLUSÃO

A caracterização das partículas é de fundamental importância no processo de moagem, sendo essencial na seleção do mecanismo adequado para a fragmentação das partículas, assim como do equipamento a ser utilizado.

Para o experimento de micronização realizado neste trabalho, foi de fundamental importância a uniformidade das partículas e da alimentação.

Na micronização por moinhos a jato de ar, do tipo espiral, a taxa de alimentação teve grande influência no tamanho final das partículas micronizadas, como se pode verificar nos resultados dos produtos 1 a 5.

A micronização está diretamente ligada à quantidade de partículas dentro da câmara de moagem. Quando a câmara possui uma quantidade grande de partículas, o número de choques entre as partículas e em uma mesma partícula é diminuído. Isto se deve a redução de espaço para circulação, e a redução da velocidade das partículas devido ao

aumento da carga, conseqüentemente, reduzindo a eficiência de moagem.

No produto 1 com taxa de alimentação de 1kg/h o tamanho $d(0.9)$ das partículas foi de 22,3 μm ; e no produto 5 no qual a taxa de alimentação era de 10 kg/h, o tamanho $d(0.9)$ das partículas foi de 65,2 μm . Nos produto com taxa de alimentação intermediária os resultados foram intermediários, e a distribuição dos tamanhos das partículas não foram lineares com o aumento da taxa de alimentação

O tamanho das partículas é inversamente proporcional a área de superfície específica: o produto 1 com tamanho $d(0.9)$ de partículas de 22,3 μm , possui uma superfície específica de 1,23 m^2/g e o produto 5 com tamanho $d(0.9)$ de partícula de 65,2 μm , possui uma superfície específica de 0,567 m^2/g .

As análises granulométricas realizadas possibilitaram quantificar o tamanho máximo das partículas em cada produto e também o Diâmetro médio de Sauter, $D[3,2]$, e foram obtidos os seguintes resultados: Produto 1, $D[3,2] = 4,9 \mu\text{m}$; Produto 2, $D[3,2] = 7,4 \mu\text{m}$; Produto 3, $D[3,2] = 9,4 \mu\text{m}$; Produto 4, $D[3,2] = 9,8 \mu\text{m}$; Produto 5, $D[3,2] = 10,6 \mu\text{m}$ e Amostra $D[3,2] = 17,1 \mu\text{m}$.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, S. I. M. (2007), Micronização Supercrítica do β - Caroteno - Curso de Engenharia Biológica, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 90p. (dissertação de mestrado).
- BERALDO, J. L. (1987), Moagem de Minérios Moinhos Tubulares, Marcel Edgard Blücher, São Paulo.
- BLUMENAUER, H.; PUSCH, (1982), Technische Bruchmechanik, VEB Deutscher Verlag für Grundstofftechnik, Leipzig.
- CARVALHO, M. X. S. (2012), Equipamentos de Fragmentação: Uma R Avaliando Circuitos Alternativos para a Moagem de Finos. - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais,

Belo Horizonte, 70p. (monografia especialização).

- FIGUEIRA, H. V., ALMEIDA, S. L., LUZ, A. B. (2004), Cominuição: Princípios de Cominuição. In: Tratamento de Minérios, CETEM, Marcel Decker Inc., Rio de Janeiro.
- GALERY, R. (2011), Fragmentação de Minérios: Primeira Parte. Belo Horizonte: UFMG, 23 p.
- JOSHI, J.T.(2011), "A Review on Micronization Techniques. Journal of Pharmaceutical Science and Technology. Gujarat, p. 651-681.
- LUZ, A. B.; TOMEDI, P., MARTINS, R. (2005), Agalmatolito. In: "Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações". CETEM, Rio de Janeiro, p. 73-83.
- MALVERN: Malvern Instruments Limited). "Mastersizer 3000". Worcestershire.
- MICRO SERVICE (2012). Micronizador de Laboratório. Diadema: Micro Service, Manual.
- METSO. (2005), Manual de Britagem. Metso. 2005. 501p.
- NEUBERT, H. (1985), Estudo de tensões e cortes, Springer.
- NUOVA GUSEO. (2013), Miicroniizzatorii Jet - Miills. Piacenza: Nuova Guseo. 4p.
- ROSA, A. C. (2013), Desempenho dos Circuitos de moagem direto e inverso da Samarco. Curso de Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas e Petroleo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 134p. (dissertação de mestrado).
- WANG, Y.; FORSSBERG, E. (2005), International overview and outlook on comminution technology. Lulea Tekniska Universitet, Swenden.
- Wellenkamp, F.J. (1999), Moagens Fina e Ultrafina de Minerais Industriais: uma revisão. CETEM/MCT, Rio de janeiro. 56p.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG pelo suporte dado à apresentação deste trabalho no ENEMP 2017.