

# MOINHOS DE TAMBOR: TRANSPORTE NÃO LINEAR E PERSPECTIVAS DE SCALE-UP

J. Santos Baptista <sup>1</sup> e M. R. Machado Leite <sup>2</sup>

## INTRODUÇÃO

Na primeira parte deste trabalho apresenta-se um modelo de simulação de TRANSPORTE SELECTIVO para descrever o regime dinâmico de transporte que ocorre em moinhos de barras em fluxo contínuo. O modelo é comandado por um conjunto de PARÂMETROS CONDENSADOS, correlacionáveis com as condições operatórias que influenciam o transporte. É apresentada igualmente a metodologia para determinação experimental desses parâmetros a partir de análises granulométricas dos produtos descarregados pelo moinho durante o transiente e no regime permanente constante, tendo por base o conhecimento prévio da cinética de moagem do minério no moinho em estudo.

Na segunda parte do trabalho desenvolve-se uma metodologia para **determinação de parâmetros à escala industrial**, incluindo o **scaling-up** dos parâmetros cinéticos de moagem determinados em ensaios batch em escala laboratorial.

## PRIMEIRA PARTE

A passagem do regime de moagem de *batch* a contínuo, exigida pela necessidade de desenvolvimento de algoritmos de controlo dos circuitos industriais, tem sido conseguida à custa da introdução do conceito de Distribuição de Tempos de Residência (RTD) nos simuladores cinéticos.

No entanto este conceito, em termos de modelagem do contínuo, resolveu apenas uma parte do problema pois os modelos cinéticos suportados por RTD's conseguem aproximações ao contínuo que apenas são válidas em regime PERMANENTE.

Uma vez que o modelo contínuo a construir se insere num projecto de

---

<sup>1</sup> Assistente do DEP. MINAS da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

<sup>2</sup> Prof. Associado do DEP. MINAS da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

investigação mais lato que pretende valorizar as descrições fenomenológicas dos processos de cominuição à custa de formulações não-lineares, a impossibilidade de utilização das RTD's no caso dos regimes não permanentes constituiu o maior entrave à escolha desta solução para base do desenvolvimento do modelo contínuo em estudo.

O objectivo desse projecto de investigação é, mais do que construir bons previsores dos resultados experimentais, chegar a modelos capazes de interpretar esses resultados em termos das fenomenologias mais relevantes intervenientes no processo.

Metodologicamente, esta opção, ao aceitar o uso de MODELOS como instrumentos conceptuais fundamentais para a descrição de determinados aspectos da realidade que interessa realçar ou analisar, e nunca como descritores absolutos dessa realidade, é tipicamente uma abordagem do tipo *model driven*. Nesse sentido, a estruturação da informação subjacente a um conjunto de dados experimentais brutos vai ser obtida à custa da capacidade dos modelos fenomenológicos para interpretar esses dados com boa reprodutibilidade.

A inadequação intrínseca das abordagens com base nas RTD's para utilização em modelagem não-linear resulta do facto de toda a variabilidade da cinética de moagem ao longo do tempo ser encarada como resultante de interferências mútuas das partículas que compõem a carga (nomeadamente no seu carácter calibre em constante evolução temporal) no regime cinético de moagem. Definida deste modo, a não-linearidade poderá apenas manifestar-se, isto é, tornar-se observável, durante o regime transiente, ocultando-se depois de atingido o regime permanente, em virtude da inerente invariabilidade do calibre neste regime.

A alternativa para efectuar a passagem ao contínuo teria, ela própria, de ser encontrada, também, na gama dos modelos fenomenológicos que permitem descrever a cinética do transporte ao longo do moinho, nomeadamente a diferencialidade desse transporte no calibre das partículas.

Optou-se, então, pelo desenvolvimento dum modelo global em que a cinética da moagem permite a inclusão de vários tipos de não-linearidades e a cinética do transporte, ao permitir velocidades de deslocação diferentes para calibres distintos, vai conduzir, obviamente, a tempos de residência médios globais diferentes para esses vários calibres. Contudo, esses tempos de residência só serão acessíveis através de cálculo *a posteriori* sobre os resultados do próprio modelo e após o seu ajuste aos dados experimentais. Isto corresponde a postular directamente uma estrutura de fluxo sem passar por uma RTD.

Uma vez mais, em termos metodológicos, o caminho escolhido apresenta uma vantagem suplementar: dado que a recuperação de parâmetros do modelo de transporte se realiza a partir da amostragem da alimentação e da

descarga do moínho, esta efectuada ao longo dum transiente mais ou menos longo, pode ser realizada directamente sobre um moinho industrial, possibilitando a actualização permanente dos parâmetros do próprio modelo e abrindo caminho para o reajuste dos parâmetros cinéticos da moagem, constituindo aquilo que poderá ser apresentado como autêntico SCALE-UP da cinética determinada em regime laboratorial.

## O MODELO: a não linearidade do transporte

A estrutura fundamental do modelo desenvolvido assenta numa constatação factual que pode ser sinteticamente descrita da seguinte forma: dentro dum moínho de tambor, o minério constitui um obstáculo à sua própria passagem.

Dentro desta linha de pensamento, e se se considerar o moinho dividido em  $n$  volumes elementares  $\Delta v$ , podemos dizer que as partículas contidas em cada um desses volumes, definido por duas secções transversais contíguas  $\Delta s$  e separadas por uma distância  $\Delta l$ , constituem um obstáculo à passagem das partículas que se encontram no volume elementar imediatamente anterior.

Se, no limite, considerarmos que  $\Delta l \rightarrow 0$ , podemos supor cada volume elementar reduzido a uma secção que actua selectivamente sobre as partículas que tentam atravessá-la em função de três factores principais: **calibre, fluidez da polpa e densidade dos grãos**. Este obstáculo ao avanço das partículas pode ser representado, em termos de modelo, por um conjunto de  $n$  funções (uma por cada volume elementar) que entre em linha de conta com esses factores. A cada uma dessas funções demos o nome de **FUNÇÃO DE PASSAGEM**.

Ao mesmo tempo que o minério vai percorrendo o moinho vão-se dando as operações de moagem. Estando o moinho dividido em  $n$  secções elementares, a moagem vai, obviamente, ter lugar no interior de cada uma dessas secções. Considerou-se, então, cada uma delas a funcionar como um moinho *batch* que recebe do anterior e transfere, após um tempo de moagem  $\Delta t$ , para o moinho *batch* seguinte, uma fracção do seu conteúdo de acordo com uma lei ditada pela respectiva **função de passagem**. Para a simulação deste processo de cominuição *batch* optou-se por um modelo cinético não linear de moagem já testado e apresentado por Leite em 1984.

Fazendo um primeiro apanhado do que atrás ficou dito, é possível caracterizar o modelo como o resultado da divisão do moinho  $M$  em  $n$  volumes elementares, cada um dos quais representado por um moinho misturador a funcionar em regime *batch* em cada  $\Delta t$  e por uma função que constitui um obstáculo selectivo ao avanço das diferentes partículas em função da sua densidade, do calibre e da fluidez da polpa. No conjunto, os  $n$  moinhos elementares constituem um moinho  $M$  com transporte selectivo para as partículas com diferentes calibres e densidades (figura 1).

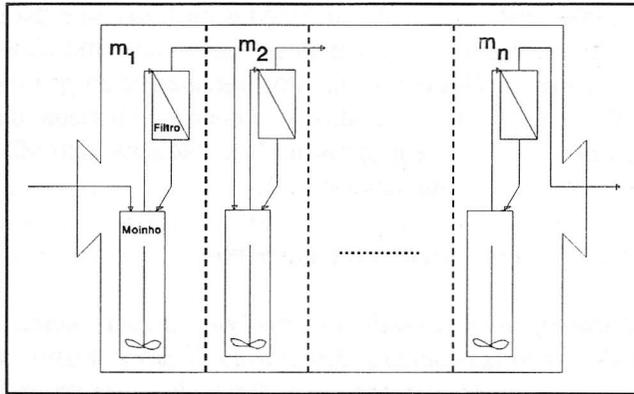


Figura 1 - Divisão do moinho em volumes elementares.

## CONDENSAÇÃO DE PARÂMETROS NA MODELAGEM DO TRANSPORTE

Com base na apresentação global do modelo, é possível aprofundar um pouco mais o conhecimento sobre cada um dos seus componentes principais: a moagem e, sobretudo, a **função de passagem**.

O funcionamento de cada um dos volumes elementares é, como já foi dito, baseado em duas funções: o **modelo cinético não linear de moagem**, e uma **função de passagem** que, em conjunto com todas as funções de passagem de todos os outros volumes elementares, constituem o **MODELO DE TRANSPORTE NÃO LINEAR EM MOINHOS DE TAMBOR**.

Modelo cinético não linear de moagem - este modelo, que se encontra já devidamente divulgado na literatura da especialidade, apenas vai ser apresentado nos seus aspectos mais relevantes. Resumidamente, salienta-se que ele se adapta à simulação dos vários tipos de moinhos à custa da manipulação dos vários tipos de **não-linearidades** intrínsecas, típicas de cada estilo de moagem, cada uma, por sua vez, comandada por um conjunto de **PARÂMETROS CONDENSADOS** à custa dos quais são obtidas todas as matrizes de cálculo, que incluem:

- 1 - Matriz destruição.
- 2 - Matriz de interferência não linear, para cálculo dos efeitos de escudo e colchão em moinho de barras e bolas.
- 3 - Matriz de interferência não linear para moagem autogénea.
- 4 - Matriz de desgaste e/ou abrasão para moagem autogénea.
- 5 - Matriz formação de novas partículas por fragmentação.

O número  $c$  de parâmetros a ajustar depende da configuração do modelo e do tipo de moinho com que queremos trabalhar e oscila entre 4 e 6.

O modelo cinético de transporte não linear, no seu actual estado de evolução, apenas considera dois desses factores, o calibre das partículas e a fluidez da polpa. Deve-se esta limitação ao facto de ainda se não dispor de dados relevantes nem de um modelo de libertação que permita, satisfatoriamente, verificar a validade de conjecturas respeitantes ao comportamento de partículas do mesmo calibre mas com densidades distintas. Este fenómeno é importante se se pensar, por exemplo, em tirar partido das oscilações de teor que necessariamente ocorrem na alimentação do moinho. Com a resolução do problema da simulação da libertação discriminatória, poder-se-á obter este tipo de dados e, conseqüentemente, partir para uma reformulação com parametrização mais completa para o modelo de transporte.

Conforme já se disse, o transporte é modelado à custa de um conjunto de funções de passagem cada uma das quais decompõe-se por sua vez, num parâmetro  $PS_i$  e num filtro comandado por dois parâmetros ( $PV_{50}^i$ <sup>3</sup> e  $PF_i$ ). Uma vez que o modelo é fenomenológico, cada um destes parâmetros possui um significado físico claro. Assim,  $PV_{50}^i$  dá uma indicação sobre o calibre médio das partículas que passam para o moinho elementar seguinte  $m_{i+1}$ ,  $PF_i$  está associado à forma do próprio filtro e de certa maneira à fluidez da polpa, o terceiro,  $PS_i$ , vai ajustar o *surtirage* global do moinho. Em resumo, o filtro permite obter uma ideia sobre calibre médio à saída do moinho elementar e sobre a fluidez da polpa ao mesmo tempo que  $PS_i$  avalia o nível de saturação da zona activa de moagem.

Com o modelo construído deste modo obtemos um conjunto de  $n$  moinhos elementares, cada um com três parâmetros, perfazendo, no total,  $3n$  parâmetros do transporte que seria necessário ajustar. Se a estes  $3n$  parâmetros adicionarmos mais  $cn$  parâmetros da moagem, obtemos, um modelo com  $(3+c)n$  parâmetros. Em resumo, tal modelo seria impraticável. O passo seguinte foi, portanto a condensação.

A simplificação do modelo para os limites do praticável impôs a afirmação de um conjunto de pressupostos que se passa resumidamente a numerar de seguida, sem qualquer justificação adicional:

1 - O conjunto de parâmetros da cinética não linear de moagem podem legitimamente ser considerados os mesmos em todos os volumes elementares  $\Delta v$  em que dividimos o moinho, uma vez que a formulação da própria cinética é do tipo não linear.

2 - Considera-se a fluidez da polpa basicamente constante ao longo do moinho  $M$ .

3 - O nível de saturação da zona activa de fragmentação é constante

---

<sup>3</sup> Consideramos  $PV_{50}^i$  como variável dependente através de uma recta que passa por  $PV_{50}^0$  (parâmetro independente) com uma inclinação  $PM$ .

ao longo de todo o moinho.

4 - A variação do calibre médio ao longo do moinho processa-se, em condições normais de funcionamento, de forma linear e decrescente da zona de alimentação para a descarga.

As excepções a esta regra estão previstas no modelo de transporte, constituindo um factor da sua não-linearidade em relação ao transporte.

Partindo agora para uma descrição mais pormenorizada e atendendo ao 1º pressuposto, não se fará mais qualquer referência ao modelo cinético de moagem não linear, passando-se a descrever exclusivamente a parametrização e condensação referentes ao **MODELO DE TRANSPORTE SELECTIVO**.

Atendendo aos pressupostos 2 e 3, podem considerar-se os parâmetros  $PF_i$  e  $PS_i$  iguais para todos os moinhos elementares. Em sua substituição, o modelo passa a ser parametrado por dois únicos parâmetros, respectivamente  $PF$  e  $PS$ . Em relação ao 4º pressuposto, que está relacionado com os parâmetros  $PV_{50}^i$ , já o problema é ligeiramente mais complicado. Contudo, ao considerar que a diminuição do calibre médio ao longo do moinho faz, também, com que o calibre médio das partículas que passam de um moinho elementar para o seguinte diminua à medida que caminhamos no sentido da descarga. E ao admitir que  $PV_{50}^i$  está relacionado com esse calibre médio. Podemos considerar que o valor deste parâmetro também diminui de forma linear no mesmo sentido. Essa condensação pode então ser efectuada substituindo todos os  $PV_{50}^i$  por dois únicos parâmetros  $PV_{50}^n$  e  $PM$ , do seguinte modo:

Fazendo

$$PV_{50}^n = \Phi(PV_{50}^1, PV_{50}^2, \dots, PV_{50}^{n-1}) \quad (1)$$

em que  $\Phi$  é, pelo menos nesta primeira fase de desenvolvimento do modelo, representado por uma função linear simples com dois parâmetros (uma recta) em que obtemos uma condensação simples, mas com um número reduzido de parâmetros suficientemente flexível, de modo a possibilitar os primeiros ajustes do modelo a resultados experimentais.

Fazendo um novo ponto da situação em relação ao modelo, dir-se-á que este é constituído por um conjunto de  $n$  funções de passagem, cada uma das quais incluindo um filtro selectivo. Estas funções estão relacionadas entre si pelos parâmetros condensados  $PV_{50}^n$  e  $PM$  que representam, respectivamente, o  $PV_{50}$  do filtro do último moinho elementar e a inclinação da recta sobre a qual se apoiam todos os  $PV_{50}^i$  dos restantes moinhos elementares. O modelo é completado pelos parâmetros globais  $PF$  e  $PS$  que tentam modelar respectivamente a fluidez da polpa e o nível de saturação da zona activa do moinho.

Para concluir a apresentação do modelo falta apenas descrever, ainda que sumariamente, a função de passagem.

Consideremos um moinho elementar qualquer  $m_i$ , com  $i < n$ . A sua **função de passagem** será dada pela expressão

$$\sum_j [(F_{ji} \Xi_i)(L_{ji} V_i)] = Q_i \Delta t \quad (2)$$

em que

$F$  - é um filtro, função de  $PV_{50}$  e de  $PF$  que nos vai indicar a percentagem de cada lote que passa para o moinho elementar  $m_{i+1}$ ;

$\Xi$  - o **estabilizador de passagem** que controla a função de modo a evitar que esta não envie para o moinho elementar  $m_{i+1}$  mais material do que o existente no moinho elementar  $m_i$ ;

$L$  - a distribuição granulométrica no moinho elementar  $m_i$ ;

$V$  - o volume mássico do moinho elementar  $m_i$ ;

$Q$  - o caudal mássico através do moinho  $M$ ;

$\Delta t$  - intervalo de tempo em que é feita a observação.

Das variáveis apresentadas, todas podem ser calculadas directamente ( $V$ ), indirectamente através do modelo cinético de moagem ( $L$ ) ou arbitradas ( $F$ ). A excepção é o estabilizador de passagem ( $\Xi$ ), que apenas pode ser calculado a partir dos restantes, dando origem à função de estabilidade de passagem.

$$\Xi_i = \frac{Q_i \Delta t}{V_i \sum_j (F_{ji} L_{ji})} \leq 1 \quad (3)$$

Este **estabilizador de passagem**,  $\Xi$ , tem uma interpretação física muito clara, de tal modo que o torna de importância vital para o controlo do funcionamento do próprio modelo. Na verdade, representa a percentagem do volume que é necessário submeter à filtragem no moinho elementar  $m_i$ , para se obter o material dos diferentes lotes que irá transitar para o moinho elementar  $m_{i+1}$ . Ao mesmo tempo, este estabilizador, garante que o caudal total que está a atravessar esse volume elementar satisfaça as condições impostas pelo filtro  $F$ .

Como da Eq.4 podem resultar valores para  $\Xi$  superiores a 1, o que representaria, na interpretação anterior, um volume filtrado superior ao do moinho, o nosso modelo vai necessitar de reduzir o seu intervalo de variação a  $[0,1]$  obrigando o valor de  $\Xi$  a regressar a este intervalo sempre que ele é ultrapassado. É este processo de realinhamento do valor de  $\Xi$  que dá origem à não-linearidade do modelo de transporte.

Como se pode verificar por uma análise atenta das equações, o único parâmetro passível de manipulação para fazer variar o valor de  $\Xi$  é  $F$ . Ou seja o filtro, uma vez que todos os outros (caudal, volume e composição granulométrica) correspondem a valores característicos do funcionamento do moinho em cada instante  $\Delta t$ . Sabendo-se que o aumento do valor de  $\Xi$  mantém uma relação com o aumento da diferença entre o valor do calibre médio dentro do moinho elementar e  $PV_{50}^i$ . Sabendo-se também que com o aumento do calibre médio dentro do moinho elementar, cujo valor é dinâmico, diminui a correlação entre estes dois valores ( $PV_{50}^i$  e calibre médio) provocando um aumento do valor de  $\Xi$ . Podemos facilmente concluir que um processo seguro e eficaz para manter  $\Xi$  dentro dos limites de exequibilidade física, é fazer subir o valor de  $PV_{50}^i$  de modo a restabelecer o equilíbrio. A subida deste valor é feita à custa do aumento da inclinação da recta de suporte, ou seja do parâmetro  $PM$ .

Esta característica não linear do modelo permite-lhe ajustar de um modo dinâmico não só os regimes transitórios decorrentes do processo de arranque, mas também oscilações bruscas na composição granulométrica da alimentação sem que os parâmetros cinéticos necessitem de ser reajustados.

Quando um aumento do calibre médio, superior à capacidade de moagem do primeiro moinho elementar, é detectado, faz-se aumentar o  $PV_{50}^i$  de todos os moinhos elementares com excepção do último ( $m_n$ ), através do aumento da inclinação da recta de suporte, ou seja, do aumento do valor do parâmetro  $PM$ , mantendo-se o parâmetro  $PV_{50}^i$  como um ponto fixo da recta. Esta medida faz com que os produtos mais graúdos se encaminhem mais rapidamente para a descarga. Tal fenómeno pode provocar, em última análise, um aumento tal do calibre médio do último moinho elementar que, por um processo idêntico ao já descrito para os restantes, provoque um aumento do seu  $PV_{50}^i$ , permitindo a saída do moinho  $M$  dos calibres mais graúdos. Quando se chega ao extremo de ter que alterar este último parâmetro, torna-se necessário um realinhamento dos valores dos  $PV_{50}^i$  de modo a não os sobrevalorizar<sup>4</sup>. Para tal é recalculado  $PM$  fixando a recta nos pontos  $PV_{50}^i$  e  $PV_{50}^n$ . Uma vez substituída a alimentação com excesso de graúdos por aquela para a qual os parâmetros foram calculados, estes retomam naturalmente os seus valores originais.

Um processo idêntico a este está em estudo para quando baixa em demasia o calibre da alimentação, levantando o risco de superfragmentação. Neste caso será possível jogar com a fluidez da polpa de modo a retirar do moinho as partículas que já atingiram as dimensões desejadas.

<sup>4</sup> Note-se que o valor destes vem sendo calculado a partir de  $PV_{50}^n$  e de  $PM$ .

## SEGUNDA PARTE

A aplicação industrial dos modelos cinéticos de simulação de moagem debate-se, há longos anos, com o problema da determinação experimental de parâmetros. As soluções disponíveis até ao momento exigem quase sempre a realização de ensaios em dispositivos que, embora devidamente padronizados (como os pêndulos de inércia ou as moagens de lotes granulométricos curtos), se encontram em condições experimentais radicalmente distintas do ambiente físico em que se processa a moagem industrial.

Em 1984, Leite desenvolveu um método para determinação global de parâmetros cinéticos sobre cargas completas, isto é, lotes granulométricos extensos. Contudo, o problema da passagem da cinética do moinho *batch* de pequenas dimensões para o moinho industrial, de diâmetro e comprimento muito maior, ficava ainda por resolver.

O método que se está a desenvolver para modelagem do transporte diferencial reinante dentro dum moinho de tambor em regime contínuo, levanta, definitivamente, uma possibilidade de solução para o problema do *scale-up* da cinética de moagem, de que sumariamente se passa a expor os pontos fundamentais.

Tomando, em primeira aproximação, a cinética de moagem determinada em regime *batch* e em escala reduzida como um bom *guess* para os parâmetros do modelo contínuo em escala industrial, o método exposto nos parágrafos anteriores permite fazer um primeiro ajustamento dos parâmetros cinéticos do modelo de transporte reinante no interior dum moinho industrial, com base nas determinações granulométricas das amostras colhidas directamente no circuito em marcha.

Uma vez na posse destes parâmetros globais do modelo, poderão ser tomados dois caminhos. Considerar esse conjunto de parâmetros como um bom *guess* global e utilizá-lo para uma corrida inicial do algoritmo de optimização com todos os graus de liberdade, isto é, com todos os parâmetros do modelo a variar, ou, em alternativa, se uma análise muito cuidada do sistema sugerir um passo intermédio, pode ser preferível fixar 1 ou 2 parâmetros, seja do modelo de moagem seja do de transporte, para obter um *guess* intermédio mais cuidado. Finalmente, será efectuado o ajuste definitivo do modelo com o máximo de graus de liberdade mas, todavia, a partir dum *guess*, senão ele próprio optimizado, pelo menos sensato.

Convém ainda referir um factor importante que deverá ser devidamente anotado. Uma vez que o transporte se assume, à partida, como sendo diferencial no calibre das partículas e da carga, isto é, não-linear *sensu stricto*, é necessário que as determinações granulométricas contra as quais o modelo vai ser ajustado (testado) tenham informação suficiente sobre as não-linearidades do fenómeno em estudo. Quer isto dizer que a amostragem

do circuito deverá ser feita durante o transiente e colher, finalmente, informação sobre o regime permanente (*steady state*).

### **SCALE-UP DA CINÉTICA DE MOAGEM: UMA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS EM AMBIENTE INDUSTRIAL**

A metodologia para a determinação dos parâmetros do transporte e efectuar o scale-up da cinética *batch* a partir dum ensaio de moagem piloto em contínuo sistematiza-se nos pontos seguintes:

1 - O primeiro passo é, obviamente, a determinação dos parâmetros cinéticos de moagem em bancada, como primeira aproximação à ordem de grandeza dos valores reais. Com este procedimento espera-se obter, desde logo, valores referentes à formação já bastante próximos dos finais, o que poderá significar, na prática e desde logo, a diminuição do número total de parâmetros a ajustar e, conseqüentemente, maior facilidade no ajuste dos restantes.

2 - Tomar um conhecimento correcto da composição granulométrica e caudal da alimentação. Embora o modelo de transporte não linear seja capaz de reagir a estas situações, é imperioso que nesta fase de determinação de parâmetros o seu controlo seja rigoroso de modo a evitar dificuldades na sua avaliação. O processo, talvez mais prático, para conseguir tal objectivo passa pelo ajuste de um modelo estatístico para a alimentação pressupondo o caudal constante. Para tal, procede-se à recolha do número necessário de amostras, de acordo com o caso concreto em estudo. Este modelo de alimentação, que não é mais do que uma distribuição de probabilidade de ocorrência de uma determinada composição granulométrica, vai servir para simular a mesma na entrada do primeiro moinho elementar.

3 - Este terceiro passo é talvez o mais importante do processo. Para o seu sucesso é necessária a conjugação de uma série de factores, entre os quais se conta o conhecimento da composição granulométrica dentro do moinho antes do seu arranque, o que pode ser conseguido por três processos:

- colheita de amostras representativas ao longo do seu interior;
- enchimento do moinho com produtos cuja composição granulométrica seja conhecida;
- arranque do moinho em vazio.

Embora, em termos de modelo, a opção por qualquer uma destas três alternativas seja indiferente, o mesmo já não ocorre na prática, onde a primeira parece ser de difícil implementação.

Com a composição granulométrica interna do moinho, antes do arranque, conhecida, dá-se início ao processo de moagem. Procede-se então à recolha de amostras da sua descarga desde  $t=0$ , durante todo o período de

transiente até que o regime permanente seja atingido. Da representatividade destas amostras e da precisão com que os intervalos de tempo entre cada colheita são medidos, poderá depender o sucesso do ajuste.

É contra a evolução das composições granulométricas destas amostras ao longo do tempo que se procura não só ajustar os parâmetros cinéticos, mas também relacionar o tempo real com o tempo de integração do modelo, assim como determinar o número de moinhos elementares que melhor se ajusta à configuração de moagem em estudo.

4 - Recolha de uma amostra no interior do moinho, próximo da boca de descarga. Esta amostra, pode ser recolhida com o moinho parado após ter atingido o regime permanente. Esta informação é importante para o arranque do processo de ajuste pois é necessário indicar ao modelo os parâmetros de partida para a pesquisa (*guess* inicial). O elevado número destes parâmetros e, conseqüentemente, de dimensões da função a ajustar (um hiperespaço entre 8 e 11 dimensões) conduz, como facilmente se imagina, a que o sucesso da operação vá depender, em grande medida, da distância a que esses valores se encontrem da realidade, com o risco da obtenção final, de parâmetros referentes a um mínimo local e, conseqüentemente, incapazes de efectuar uma boa previsão.

Esta colheita destina-se concretamente à obtenção de um *guess* para os parâmetros  $PV_{50}^n$  e  $PF$ .

Para tal deve ser seguida a seguinte rotina: após a recolha da amostra no interior do moinho e obtida a sua distribuição granulométrica ( $G_j$ ), vai tentar obter-se o filtro  $F$  da função de passagem a partir desta distribuição e da proveniente da recolha efectuada na descarga do moinho ( $G_d$ ) para um tempo de moagem igual:

$$G_{t_i} \cdot F_j = G_{d_j}$$

ou

$$F_j = \frac{G_{d_j}}{G_{t_j}} \quad (4)$$

Aos valores obtidos para  $F_j$  vai agora tentar ajustar-se uma função  $F$  cujos parâmetros são os do modelo ( $PV_{50}^n$  e  $PF$ ).

## CONCLUSÕES

O modelo de transporte não linear apresentado propõe uma filosofia de abordagem do problema distinta das tradicionais, nomeadamente quando à simplicidade de abordagem do próprio processo como ponto de partida para a construção do modelo. Incorrem-se assim em alguns riscos, inerente ao percurso de qualquer novo caminho, mas possibilitando-se a abertura de novas perspectivas, como seja a possibilidade de recuperação de parâmetros a partir do próprio processo. Paralelamente, o problema do *scale-up* da cinética *batch* aparece agora como um problema metodologicamente resolvido. E a resposta às condições dinâmicas de flutuação dos calibres e diluições num moinho industrial tem uma perspectiva de solução não empírica.

## REFERÊNCIAS

Leite, M. R. Machado, 1984 - *Moagem Não Linear em Moinho de Barras*, Ph.D. Thesis, Dep. Minas F.E.U.P..