

MODELAGEM MECANICISTA DA MOAGEM

R.M. Carvalho e L.M. Tavares¹

¹Laboratório de Tecnologia Mineral, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
(PEMM/COPPE)

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia, Bloco F, Sala 210, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, CEP 21945-970.

Tel. 21 22901615, fax 21 22901615

E-mail: rodrigo@metalmat.ufrj.br

RESUMO

Historicamente a descrição matemática dos processos de cominuição tem dependido fortemente de diversos parâmetros empíricos, o que muitas vezes impossibilita a previsão adequada do desempenho dos moinhos em termos de capacidade, qualidade do produto, bem como do consumo energético envolvido na operação. Recentemente, com o desenvolvimento de ensaios que permitem caracterizar partículas de minério de maneira adequada e com o uso do método dos elementos discretos para simular o ambiente de moagem nos moinhos, tornou-se possível formular um modelo mecanicista que descreve a redução de tamanho de partículas que ocorre nesses equipamentos. Com o intuito de mostrar o potencial do modelo mecanicista da moagem na simulação são apresentados resultados que mostram como a taxa de quebra de partículas em um moinho de bolas de laboratório varia em função da frequência de rotações, do grau de enchimento, do tamanho de bolas e da faixa de tamanhos de um minério de cobre na moagem descontínua em laboratório. Os resultados mostram que as previsões oferecidas pelo modelo são coerentes com evidências publicadas na literatura, obtidas após extenso trabalho experimental. Isso demonstra o grande potencial do modelo mecanicista da moagem como ferramenta poderosa no projeto e otimização de moinhos.

PALAVRAS-CHAVE: DEM; método dos elementos discretos; moinhos; modelagem mecanicista da cominuição.

1. INTRODUÇÃO

A previsão do desempenho de equipamentos de cominuição tem sido um grande desafio na indústria mineral. A ferramenta provavelmente mais conhecida usada nessa tarefa é o método de Bond, através da qual o desempenho de moinhos de bolas é estimado com o auxílio do índice de trabalho (*Bond work index*) e equações empíricas. Uma importante alternativa são os modelos derivados do Modelo do Balanço Populacional (MBP), que, no caso dos processos de cominuição, apresentam-se na forma de um balanço de massas por classe de tamanho de partícula (Austin *et al.*, 1984). Entretanto, de forma análoga ao método de Bond, o MBP não possui em sua formulação descrições explícitas que permitam prever a influência das principais variáveis no processo, o que requer, invariavelmente, o uso de equações empíricas com diversos parâmetros. Evidentemente, quando dados de operação em usina piloto ou industrial se encontram disponíveis, tais parâmetros podem ser adequadamente ajustados e os modelos validados, resultando em previsões confiáveis para moinhos operados sob condições normais. Entretanto, quando o usuário se depara com um projeto “greenfield” com um minério pouco conhecido, o risco associado às previsões realizadas a partir de ensaios de laboratório é muito mais alto.

Dessa maneira, a forma empírica como o MBP descreve a influência das variáveis operacionais e de projeto limita a sua aplicação a condições consideradas “normais” de operação para minérios “típicos”. Além disso, a influência de algumas variáveis, como o perfil do revestimento do moinho, nem sequer é considerada nas equações empíricas utilizadas. Parte do motivo para essa limitação diz respeito ao fato que os ensaios empregados na caracterização para a moagem são incapazes de desacoplar as contribuições do material (minério) e do equipamento, bem como de discriminar a influência de cada um dos mecanismos de quebra na fragmentação. Além disso, os modelos não incorporam efeitos como a variabilidade entre partículas contidas em um único intervalo de tamanhos, bem como o efeito do enfraquecimento das mesmas quando são submetidas a esforços repetidos, os quais se tornam particularmente importante na moagem de grossos (Tavares e Carvalho, 2009).

A evolução do Método dos Elementos Discretos (DEM) permitiu a simulação do ambiente mecânico de transferência de energia no interior dos equipamentos de cominuição, como, por exemplo, no caso dos moinhos tubulares, o movimento dos corpos moedores (Mishra e Rajamani, 1992). Em paralelo, diversos autores (King e Bourgeois, 1993; Tavares e King, 1998) contribuíram na descrição do processo de quebra em função de diferentes características de minério e mecanismos de quebra. Entretanto poucos trabalhos mostraram potencial de prever totalmente a quebra em processos de cominuição a partir das características do material e das condições do processo.

O presente trabalho objetiva descrever o modelo mecanicista da cominuição, aplicado ao moinho de bolas. Detalhes das equações que compõem o modelo, bem como do procedimento experimental demandado para caracterização do minério são suprimidos, tendo em vista as limitações de espaço da publicação. A fim de mostrar o potencial do modelo, são realizadas simulações que mostram o efeito de alguns parâmetros de operação da moagem na taxa de quebra de partículas.

2. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE QUEBRA DE MINÉRIOS

A caracterização adequada do comportamento de diferentes minérios quando submetidos a esforços mecânicos é vital para a modelagem mecanicista da cominuição. A primeira informação fundamental relevante à quebra de uma partícula de minério é a quantidade de energia que partículas são capazes de absorver para que ocorra sua

fratura. Essa energia, que varia de partícula para partículas, é denominada energia de fratura e, geralmente, varia em função da composição mineralógica, forma e tamanho da partícula. Tavares e King (1998) mostraram que a variabilidade nas energias de fratura de partículas contidas em uma mesma classe de tamanhos e composição pode ser adequadamente descrita utilizando a distribuição log-normal. A determinação das energias de fratura de partículas de um minério pode ser realizada com o ensaio de queda de peso na ILC (célula de carga de impacto), na qual partículas são posicionadas sobre uma barra de aço e submetidas à queda de um peso uma por vez. A barra é instrumentada com sensores capazes de medir a propagação da onda de choque. Uma vez conhecida a energia aplicada sobre as partículas, é possível calcular o quanto foi absorvido na quebra. Tendo em vista o caráter tedioso dos experimentos envolvendo partículas finas, recentemente Barrios *et al.* (2011) propuseram um ensaio que permite, com o auxílio de ensaios de quebra de partículas em leitos, estimar as energias de fratura de partículas medindo até 150 μm .

Uma vez que a partícula quebra, é importante descrever como seus fragmentos irão se distribuir ao longo das classes de tamanhos menores. Nesse caso, a redução de tamanho da partícula mãe pode ocorrer de duas formas ou mecanismos: quebra do corpo da partícula ou a quebra superficial. A quebra do corpo da partícula é descrita pela função quebra de impacto e esta depende essencialmente das características do minério, bem como da energia aplicada. Neste caso, a caracterização da função quebra é realizada com o auxílio de ensaios do tipo de queda de peso (DWT), nos quais a energia aplicada é cuidadosamente controlada e a distribuição de tamanhos dos fragmentos é analisada. Correlaciona-se o nível de fragmentação ao nível energético, com as chamadas relações de t_{10} x energia (Tavares, 2007). A distribuição de fragmentos é modelada com a utilização de modelo baseado no conjunto de funções beta incompleta baseado no valor de t_{10} , conforme descrito em Tavares e Carvalho (2009).

Quando em um evento de impacto, uma partícula não quebra, a energia absorvida é utilizada na propagação de trincas, de forma a alterar a resistência à fratura da partícula. Esse efeito em uma população de partículas pode ser descrito pelo modelo matemático desenvolvido por Tavares e King (2002), o qual é baseado na mecânica do dano. O modelo de Tavares depende de apenas um parâmetro a ser ajustado, a partir de resultados de um experimento de queda de peso, no qual partículas são submetidas a repetidos impactos até que ocorra a sua fratura, ou perda de integridade.

Para colisões de baixa energia sofridas pela partícula, nas quais não ocorre quebra do corpo da partícula, o mecanismo de quebra predominante é o da abrasão, ou quebra superficial. Nesses casos a partícula mãe dá origem a partículas finas. Atualmente a caracterização da quebra superficial é feita a partir de resultados de ensaio de tamboramento conforme descrito em Tavares e Carvalho (2009).

3. MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

O método dos elementos discretos permite simular o movimento de partículas sólidas, sejam elas partículas de minério ou mesmo corpos moedores, no interior dos equipamentos. Desde a primeira aplicação do DEM para simular o movimento da carga em um moinho de bolas (Mishra e Rajamani, 1992), pesquisadores vem tentando desenvolver modelos e metodologias que permitam usar a técnica para efetivamente

prever a quebra de partículas no interior dos equipamentos de cominuição. Assim diversas abordagens surgiram e estas podem ser classificadas em quatro tipos. Na primeira (DEM total), partículas de minério são descritas no DEM, como sendo um agregado de outras partículas menores unidas por uma força de coesão. Esta abordagem é a que mais demanda o maior esforço computacional, sendo realisticamente inviável para utilização na simulação de moinhos industriais. Além disso, existem dúvidas na capacidade do DEM (Herbst, 2004) de descrever com a fidelidade demandada a quebra de partículas. A segunda abordagem, potencialmente aplicável na simulação de moinhos tubulares, também inclui partículas de minério na simulação, porém, neste caso, essas são esferas sólidas que são substituídas por esferas filhas, quando é detectado algum contato no qual a energia envolvida é suficiente para causar fratura da partícula. Essa abordagem, a qual pode ser denominada de “DEM parcial” é defendida por Powell (2006) em seu modelo unificado da cominuição. Entretanto, até o presente momento, o modelo não foi formulado de forma que a sua utilização fosse viável. A terceira é a abordagem defendida pelo grupo de pesquisa da COPPE-UFRJ, que corresponde ao uso do DEM para simular apenas o movimento da carga moedora e, a partir das informações sobre a frequência e a magnitude dos choques causados pelos corpos moedores, acoplar esses dados ao modelo do balanço populacional na sua forma em microescala. Assim, essa formulação se baseia no acoplamento do MBP ao DEM. Neste caso, o esforço computacional é minimizado, dependendo quase que exclusivamente do esforço computacional envolvido na simulação por DEM. A Figura 1 ilustra a comparação entre as quatro abordagens, para o caso da simulação de um moinho tubular rotativo. O esforço computacional cresce rapidamente com o diâmetro, pois o número de corpos moedores a serem simulados cresce com o quadrado do diâmetro do moinho. Felizmente, atualmente é possível realizar simulações em DEM com 5 milhões de partículas em apenas alguns dias de computação em um servidor Intel Xeon X3370 3000GHz.

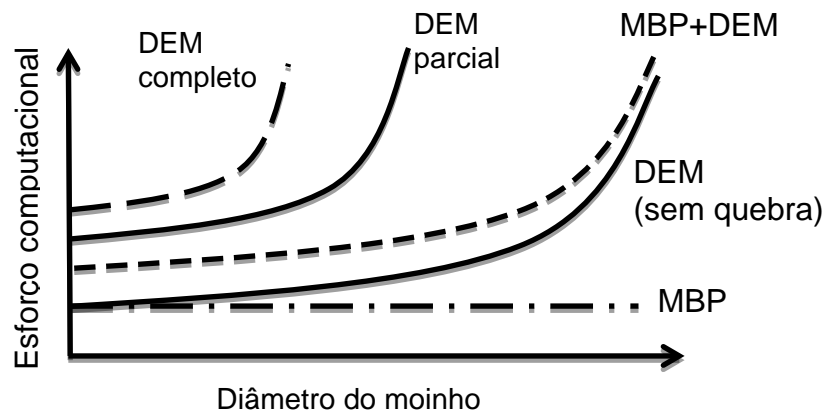


Figura 1 – Comparação entre as diversas abordagens para modelagem de um moinho tubular em termos do esforço computacional necessário

Segundo a metodologia adotada na COPPE-UFRJ, é possível medir a magnitude energética e frequência, por exemplo, de cada choque que ocorre em um moinho de bolas ou até mesmo em partículas sendo projetadas contra revestimentos em chutes em operações de transferência em tempos moderados de processamento, presumindo-se que parâmetros adequados de contato se encontrem disponíveis (Ramos *et al.*, 2011).

4. FORMULAÇÃO GERAL DO MODELO

O modelo requer dois grupos de informações principais, o primeiro diz respeito a diversas características das partículas que sofrerão o processo de quebra, enquanto o segundo é relacionado a características do equipamento, conforme apresentado no esquema da Figura 2. Dessa maneira, o modelo realiza a importante tarefa de desacoplar as contribuições do material e do processo na modelagem dos processos de cominuição.

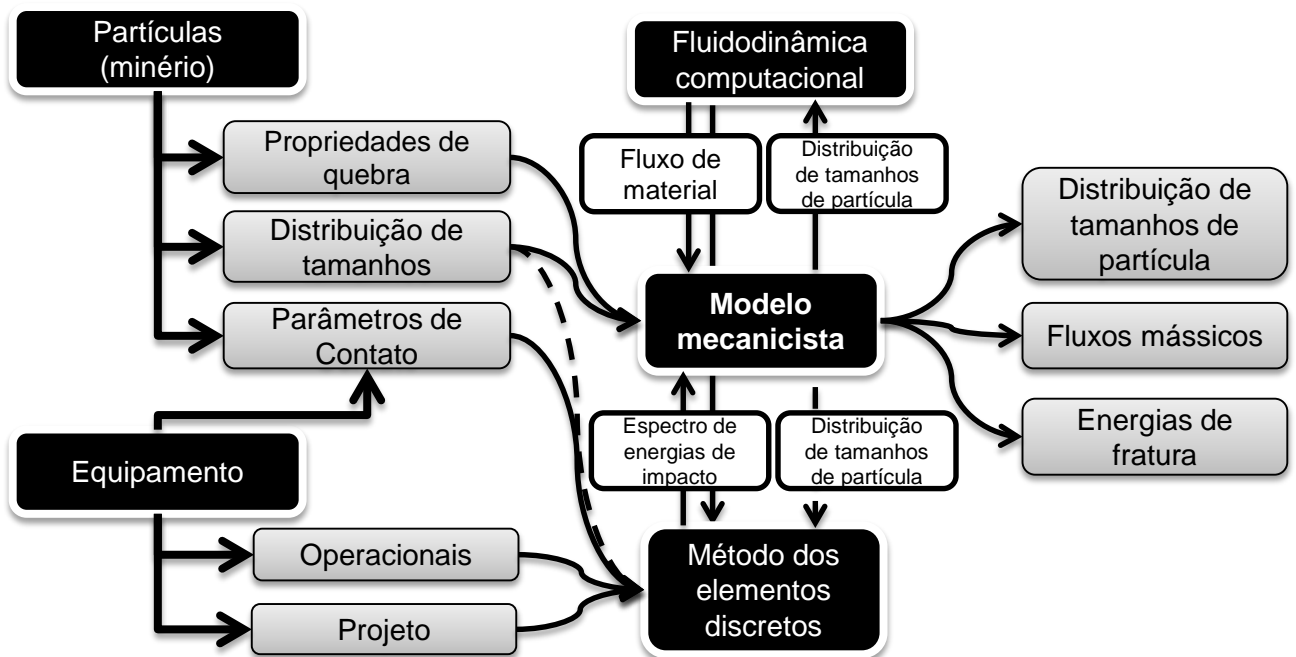


Figura 2 – Esquema representando os blocos de informações do modelo mecanicista da cominuição

As propriedades de quebra das partículas de minério, juntamente com a distribuição de tamanhos, podem ser determinadas independentemente do equipamento que se deseja simular. Essas informações alimentam diretamente o núcleo do modelo mecanicista.

Os parâmetros do modelo de contato que irão alimentar as simulações em DEM dependem tanto das partículas de minério quanto do equipamento e necessitam de calibração adequada para que a simulação do movimento da carga possa fornecer resultados quantitativos confiáveis (Ramos *et al.*, 2011). No caso do moinho de bolas, as condições operacionais e de projeto necessárias para as simulações usando o DEM são, geometria do moinho, distribuição de tamanhos dos corpos moedores, perfil do revestimento, entre outras. Como resultado, o DEM então fornece ao modelo mecanicista a distribuição de energias de impacto, ou seja, a frequência e a amplitude dos choques que ocorrem no moinho por unidade de tempo.

Existem alguns casos particulares, como é o caso dos moinhos SAG, nos quais partículas de minério mais grossas também atuam como corpos moedores. Desta forma, essas partículas contribuem na transferência de energia para a quebra das partículas menores e devem ser simuladas em DEM. Ainda, a distribuição de tamanho desses corpos moedores, chamados de autógenos, pode mudar ao longo do tempo, fazendo com que o regime energético dentro do moinho também se altere (Figura 2). Dessa maneira, uma nova simulação em DEM deverá ser

realizada a partir de informações da população de partícula oriundas do cálculo da quebra no modelo mecanicista, como mostrado pela seta tracejada entre os blocos do modelo mecanicista e do DEM na Figura 2, o que demanda uma solução iterativa do modelo mecanicista da moagem.

Por fim, a estrutura do modelo ainda permite o intercâmbio de informações entre o modelo mecanicista da moagem e modelos baseados em CFD (Fluidodinâmica computacional), de modo que o cálculo do regime de transporte de material no moinho pode ser estimado levando em consideração a contribuição do fluido no processo. Entretanto, estudos nessa área ainda são escassos, apesar da grande importância da água na simulação de moagens realizadas a úmido.

Como saídas do modelo mecanicista, tem-se as distribuições de tamanhos de partícula do *hold-up*, dos fluxos de descarga, informações dos fluxos mássicos e, ainda, das energias de fratura das partículas no produto do moinho, as quais irão influenciar a resposta do material em processos subsequentes de cominuição.

5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A fim de demonstrar a aplicabilidade do modelo mecanicista na previsão de resultados de moagem, foram realizadas simulações que permitem avaliar a influência de alguns parâmetros operacionais na previsão das taxas médias de quebra de partículas um minério num moinho descontínuo de laboratório de 30x30cm, contendo quatro barras elevadoras de 7 mm de altura por 27 mm de largura (Figura 3.a).

O espectro de energias de impacto relativo ao caso base do estudo, ou seja, o moinho operando a 67% da velocidade crítica, com grau de enchimento de 30%, com preenchimento de vazios de 100 % e com corpos moedores (bolas) de 25 mm é apresentado na Figura 3.b. O espectro de energias de impacto mostra que ocorrem por volta de 110,000 choques por segundo, com energia máxima de colisão entre 0,01 e 0,1 J.

Para cada cenário investigado na análise de sensibilidade foi executada uma simulação em DEM de modo a gerar o espectro de energias de impacto correspondente. Os parâmetros de contato utilizados no DEM, para o par aço-aço envolto por minério são apresentados na Tabela I e foram obtidos por calibração visual do movimento dos corpos moedores capturados a partir de ensaio em moinho com tampa acrílica transparente, tal qual descrito em Ramos *et al.* (2011). As propriedades de quebra do minério de cobre simulado foram extraídas de trabalho anterior dos autores (Barrios *et al.*, 2011).

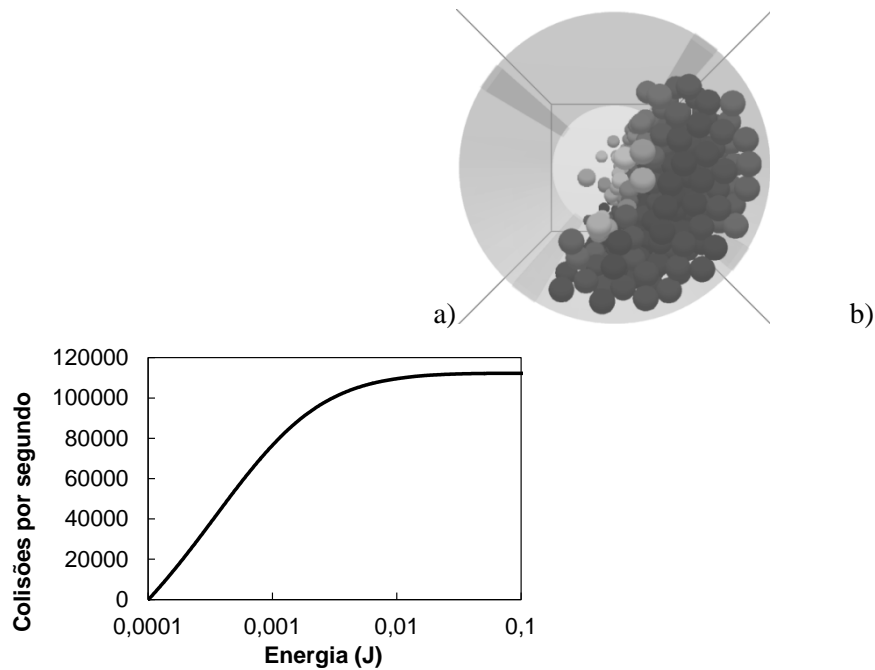


Figura 3 – Moinho simulado em DEM com grau de enchimento de 30% girando a 67% da sua velocidade crítica (a) e espectro de energias de impacto (normal) na sua forma acumulada (b)

Tabela I – Parâmetros utilizados nas simulações por DEM

Razão de Poisson	0,3	Coefficiente de restituição	0,35
Módulo de cisalhamento (GPa)	10	Coefficiente de atrito estático	0,34
Massa específica (kg/m ³)	7800	Coefficiente de atrito de rolamento	0,28

Primeiramente avaliou-se o efeito do grau de enchimento. As simulações por DEM mostram que tanto a potência quanto a frequência de colisões aumentam com o grau de enchimento. Isso se deve ao maior número de corpos moedores no interior do moinho (Figura 4.a). Por outro lado, o efeito na taxa de quebra (representada em termos relativos, pela razão entre a taxa de quebra simulada e o valor máximo obtido nas diferentes simulações) não foi muito significativo, mesmo quando foram avaliadas as moagens em batelada de duas faixas de tamanho distintas: 1,70-1,18 mm e 0,600-0,425 mm (Figura 4.b).

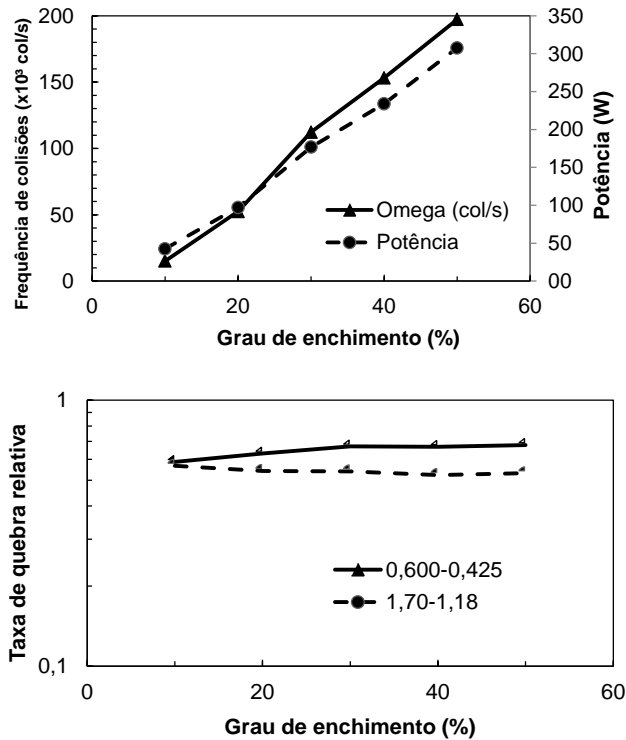


Figura 4 – Efeito do grau de enchimento na potência, frequência de colisões (ω) e taxa de quebra relativa para duas faixas de tamanhos de partícula

Adicionalmente, foi avaliado o efeito da frequência de rotações do moinho, representada pela porcentagem de sua velocidade crítica, mantendo-se constante o grau de enchimento em 30 %. O efeito na frequência de choques apresentou valores máximos próximo a condição de 70 % da velocidade crítica (Figura 5.a), o que mostra que o DEM é capaz de reproduzir uma condição operacional comum nesse tipo de operação. A Figura 5.a. ainda mostra que a potência aumenta com a frequência do moinho. Entretanto, para velocidades próximas à 100 % da velocidade crítica era de se esperar um decréscimo em seu valor ocorreria, pois, nesse caso, parte das bolas já se encontram em regime centrífugo, movimentando-se junto à carcaça do moinho. O efeito na taxa de quebra, novamente para duas faixas de tamanho diferentes, mostrou que, quanto maior a frequência, maior a taxa de quebra, porém os valores tendem a um valor máximo (Figura 5.b). O ponto ótimo de operação, nesse caso seria aquele no qual seria atingida a mais alta taxa quebra com o mais baixo consumo energético possível. As simulações indicam esse ponto em torno de 70 % da velocidade crítica.

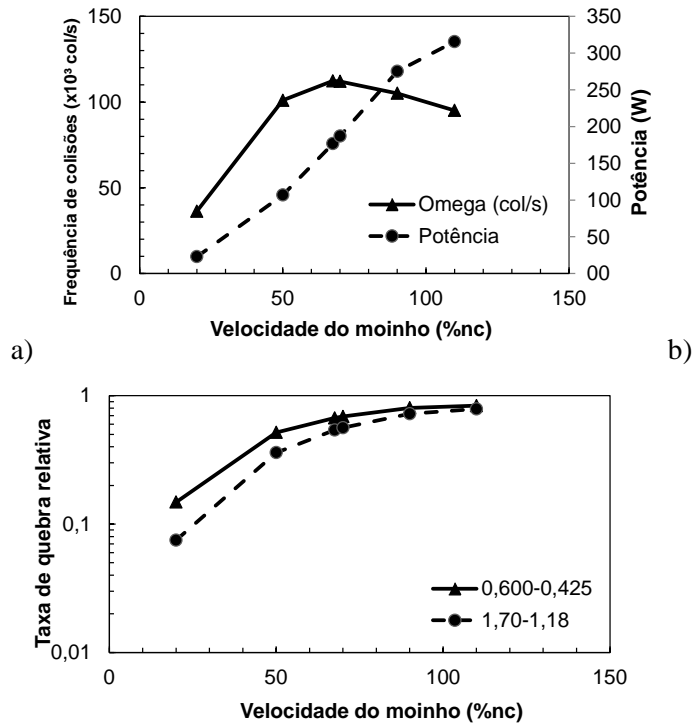


Figura 5 – Efeito da frequência do moinho na potência, frequência de colisões (ω) e na taxa de quebra relativa para dois tamanhos de partícula

Por fim, utiliza-se o modelo mecanicista na previsão das taxas de quebra no moinho em operação em batelada quando este é operado, utilizando bolas de tamanho uniforme de 25 mm e de 40 mm. Conforme é apresentado na Figura 6.a, a taxa de quebra apresenta valores máximos para tamanhos de partícula diferentes para cada tamanho de bola. No caso das bolas de 25 mm para o minério simulado, a taxa máxima ocorre para partículas com tamanhos de, aproximadamente, 0,6 mm, enquanto que, para bolas de 40 mm, a taxa máxima ocorre para partículas medindo aproximadamente 1 mm. Estes resultados estão em concordância, ao menos qualitativamente, com aqueles apresentados por Austin e Concha (1994). Adicionalmente é apresentado na Figura 6.b o resultado do modelo de captura de partículas utilizado, proposto por Barrios *et al.* (2011), o qual mostra que o número de partículas capturadas em cada colisão diminui significativamente com a redução do tamanho dos corpos moedores.

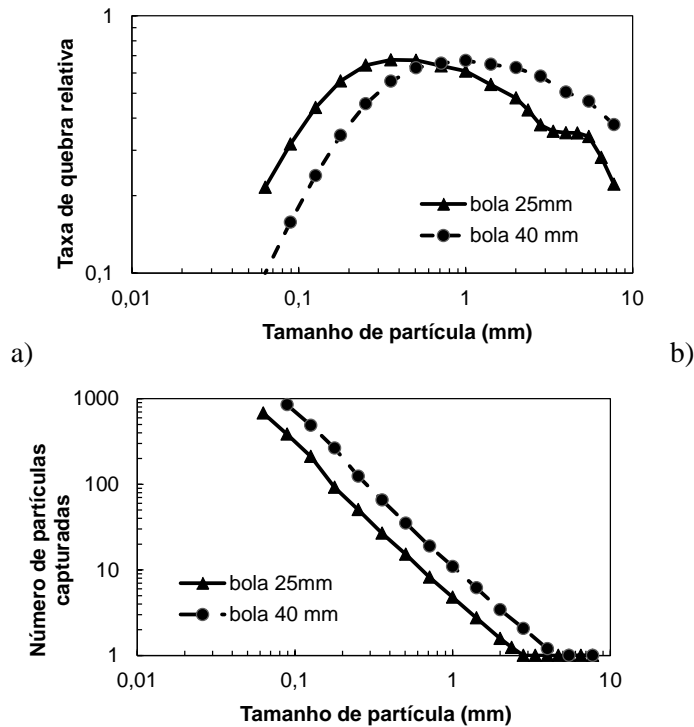


Figura 6 – Efeito do tamanho de bola na taxa de quebra das partículas e resposta do modelo de captura de partículas proposto por Barrios *et al.* (2011)

6. CONCLUSÕES

O modelo mecanicista da moagem oferece uma estrutura na qual as contribuições do material e do processo podem ser devidamente caracterizadas, permitindo um desacoplamento completo das contribuições do material e do processo nos resultados da operação de cominuição.

A análise de sensibilidade do modelo na moagem no moinho de bolas demonstrou que é possível reproduzir efeitos já observados na literatura, como o do grau de enchimento, da velocidade de rotação e ainda do tamanho dos corpos moedores na potência do moinho e na taxa de quebra das partículas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, AMIRA e VALE pelo apoio financeiro ao estudo e a DEM Solutions pelo fornecimento do EDEM Academic.

REFERÊNCIAS

- Austin L.G., Klimpel R. and Luckie, P.T., "Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling", AIME, SME, New York, USA (1984), 1984.
- Barrios, G. K. P., Carvalho, R. M., Tavares, L. M., Extending breakage characterisation to fine sizes by impact on particle beds, *Mineral Processing and Extrative Metallurgy (Trans. Inst. Min Metall. C)*, v120, n1, p37-44, 2011
- Herbst, J.A., "A microscale look at tumbling mill scale-up using high fidelity simulation", *International Journal of Mineral Processing*, v. 74, s. 1, pS299-S306, 2004.
- King, R.P. Bourgeois, F.S., "Measurement of fracture energy during single-particle fracture", *Minerals Engineering* 4, v. 6, n. 4, pp. 353-367, 1993.
- Mishra, B.K., Rajamani, R.K., The discrete element method for the simulation of ball mills, *Applied Mathematical Modelling*, v. 11, p. 598-604, 1992.
- Powell, M.S., The Unified Comminution Model - a conceptually new model. *Anais do XXIII IMPC. 3 - 8 Sep. Istanbul, Turkey, 2006.*
- Ramos, E. S., Carvalho, R. M., Tavares, L. M. M., Simulação do movimento da carga em moinhos de bolas utilizando o método dos elementos discretos, XXIV ENTMMME, Salvador, Bahia, (submetido) 2011
- Tavares, L. M., Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation, *Powder Technology*, v. 190, p. 327-339, 2009.
- Tavares, L.M., Breakage of Single Particles: Quasi-Static, *Handbook of Powder Technology*, v. 12, p. 3-68, 2007.
- Tavares, L.M., Carvalho, R.M., Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills, *Minerals Engineering*, v22, p650-659, 2009
- Tavares, L.M., King, R.P., "Modeling particle breakage by repeated impacts using continuum damage mechanics", *Powder Technology*, v.123, n. 2-3, pp. 138-146, 2002.
- Tavares, L.M., King, R.P., "Single-particle fracture under impact loading", *International Journal of Mineral Processing*, v. 54, n. 1, pp. 1-28, 1998.