



ESTUDO EXPERIMENTAL DA MOAGEM DE CLÍNQUER EM MOINHO DE BOLAS E DE SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS CORPOS MOEDORES UTILIZANDO DEM

AMANDA A. L. SANTOS^{1*}, SUELLEN M. NASCIMENTO¹

¹Universidade Federal de Lavras, Graduação em Engenharia Química
Escola de Engenharia de Lavras
*e-mail: amandalsants@gmail.com

RESUMO - O Método dos Elementos Discretos (DEM) é uma ferramenta numérica consolidada para a simulação de colisões em sistemas particulados. Neste trabalho, o método foi usado para estudar o movimento dos corpos moedores em moinhos de bolas, operação mais utilizada na moagem do clínquer, componente majoritário do cimento. Dentre as variáveis que afetam a dinâmica dos sólidos nos moinhos e, conseqüentemente, a distribuição granulométrica final do material moído, estão a velocidade de rotação e as frações de corpos moedores e de clínquer. Realizaram-se experimentos variando-se as velocidades de rotação em 15, 31 e 47 rpm e as frações de enchimento de clínquer e carga moedora em, respectivamente, 2,5; 5 e 7,5% e 2; 4 e 6% do volume do tambor. Utilizando o DEM, foram determinados os números e intensidades das colisões entre os corpos moedores e entre corpos moedores e paredes do moinho. Compararam-se, então, efeito das colisões, obtidas em DEM, sobre o diâmetro das partículas moídas, através da granulometria fina do clínquer. Foi plausível atribuir que o regime de escoamento influenciou diretamente na granulometria final do produto e a maior parte das colisões efetivas para a moagem foram das colisões entre os corpos moedores.

INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de cimento consiste, basicamente, na calcinação e na fusão de um material constituído de, aproximadamente, 94% (p/p) de calcário, 4% (p/p) de argilas e 2% (p/p) de óxidos de ferro e alumínio em um forno rotativo operando a temperaturas de cerca de 1450°C. Nesse forno, depois de as matérias-primas serem submetidas aos processos de moagem e dosagem, acontece uma série de reações, em que o material é sinterizado e parcialmente fundido, o que dará origem ao clínquer (Rocha et al., 2011; Andrade et al., 2002). Para que seja obtido o cimento, após o acréscimo de aditivos, esse clínquer deve ser resfriado e moído (Andrade et al., 2002; Varela; Vieira, 2005).

A moagem é uma operação unitária com alto consumo energético, consumindo cerca de

70% da energia elétrica de uma planta de produção de cimento convencional (Harder, 2003). Do montante de energia consumido nesse processo, cerca de 40% é consumido na moagem do clínquer (Jankovic et al., 2004). Apesar de sua eficiência energética ser muito baixa, os moinhos de bolas são tradicionalmente os equipamentos mais usados para moagem desse material (Camalan; Hoşten, 2015; Sridhar et al., 2016; Mishra et al., 2015).

Esse equipamento consiste em um tambor cilíndrico que gira horizontalmente em torno do seu próprio eixo. Dentro dele, são colocados corpos moedores, que devem ser grandes, duros e pesados em relação ao minério. Além disso, na superfície interna do tambor, pode haver suspensores para elevar a carga moedora a alturas maiores, suficientes para promover a quebra por impacto do material a ser moído (Rezaeizadeh et al., 2010). O moinho de bolas

pode ser modelado, então, como um tambor rotatório com suspensores.

Os tambores rotatórios podem apresentar diferentes regimes de escoamento (deslizamento, surgimento, caimento, rolamento, cascadeamento, catarateamento e centrifugação), que dependem da velocidade de rotação, grau de enchimento do tambor, propriedades físicas do material e geometria da parte cilíndrica (Mellmann, 2001). Para que a dimensão do material seja reduzida pelo processo de moagem no moinho de bolas, é necessário que se opere o tambor no regime de cascadeamento, que favorece a quebra por abrasão, ou de catarateamento, que favorece a quebra por impacto. Esses dois regimes possuem em comum a elevação da carga de material a maiores alturas, o que fornece mais energia ao sistema. (Figueira et al., 2004; Metzger; Glasser, 2013).

O regime de catarateamento possui uma característica importante: a posição dos pontos de *shoulder* e *toe*, que fornecem a direção da carga e permitem a caracterização do regime. O ponto de *shoulder* é a altura mais alta que o corpo moedor consegue alcançar antes de sua queda. Já o ponto de *toe* é a localização mais baixa em que ocorre o contato da carga com a superfície do moinho (Poweel, 2004).

Embora seja de suma importância que o processo de moagem seja realizado em condições ideais, para que haja boa eficiência, a configuração dessa operação em escala real é cara e demorada. Assim, a modelagem computacional surge como uma alternativa para determinação das condições ideais, de maneira a reduzir esse custo (Lee et al., 2019). Alguns modelos de moinhos de bolas contam com informações de energia de colisão de simulações que não incluem partículas, apenas os corpos moedores (Datta; Rajamani, 2002; King; Bourgeois, 1993; Tavares; Carvalho, 2009). Nestes casos, deve ser estudada como a energia de colisão é dividida entre os corpos moedores e a influência dessa energia no produto do processo.

Para se estudar o movimento dos corpos moedores no interior dos moinhos, utilizam-se simulações monofásicas aplicando-se a abordagem Lagrangeana, que considera a fase sólida como partículas discretas (Cleary et al., 2003). Utilizando essa abordagem, o método

mais utilizado é o Método dos Elementos Discretos (DEM), desenvolvido por Cundall e Strack (1979) e usa a segunda lei de Newton para estimar o movimento das partículas. Além disso, uma lei de deslocamento de força para o cálculo de contatos entre partículas e entre partícula e parede é utilizada para atualizar as forças de contato (Brandao et al., 2020). A partir do conhecimento das propriedades mecânicas microscópicas das partículas de um dado material e o comportamento da interação entre elas, o DEM é capaz de modelar o comportamento macroscópico, físico e mecânico (Ramos et al., 2011).

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura acerca de moagem fazem o uso do DEM (Weerasekara et al., 2013; Cleary; Owen, 2019; Rodriguez et al., 2018). Dentre os trabalhos da literatura que empregam o método para estudos de moagem, alguns autores utilizam os resultados de energia de impacto obtidos através do DEM para a predição de taxas de quebra das partículas (Tuzcu; Rajamani, 2011; Carvalho; Tavares, 2014; Radziszewski; Allen, 2014).

Para a realização da modelagem DEM é necessária a determinação de parâmetros de entrada como o coeficiente de restituição, o coeficiente de atrito estático e o coeficiente de atrito de rolamento. O método mais utilizado é a calibração, por haver valores de coeficientes disponíveis na literatura para vários materiais e por esses valores serem capazes de representar o comportamento real do sistema (Silvério et al., 2014; Cunha et al., 2016). No caso dos moinhos operando em regime de cascadeamento e catarateamento, os pontos de *shoulder* e *toe* podem ser então usados para a caracterização do movimento.

Com base nisso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição granulométrica final do clínquer em um moinho de bolas operando em diferentes velocidades de rotação, fração de enchimento de corpos moedores e de clínquer. Através de simulações DEM, foram analisadas a dinâmica dos corpos moedores e as forças de colisões envolvidas entre eles e entre os corpos moedores e a parede. Esses resultados foram, então, relacionados com a granulometria final do produto.

MATERIAIS E MÉTODOS

Aparato experimental

O moinho consistia em um cilindro rotatório com diâmetro e comprimento interno equivalentes a 24,5 e 47 cm, respectivamente, e quatro suspensores com 3,8 cm de largura e inclinado 45° em relação à parede cilíndrica, conforme apresentado na Figura 1.

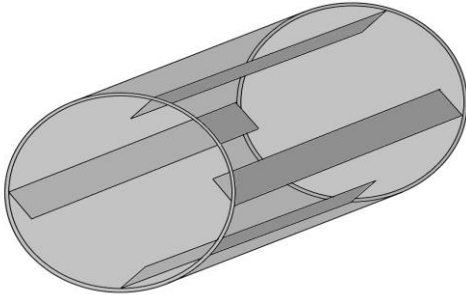


Figura 1: Módulo experimental utilizado nos testes

Os corpos moedores utilizados foram esferas de aço de 25 mm de diâmetro e o material a ser moído foi o clínquer, conforme apresentado na Figura 2. A tabela 1 apresenta seus respectivos valores de densidade e porosidade.



Figura 2: Amostra dos corpos moedores utilizados e de uma amostra de clínquer

Tabela 1: Propriedades dos materiais utilizados

Material	Densidade (kg/ m ³)	Porosidade
Esferas de aço	7890	0,368
Clínquer	3039	0,557

Para a análise da influência das variáveis propostas, empregou-se um planejamento fatorial 3^k. Para isso, utilizaram-se velocidades de rotação do tambor de 15, 31 e 47 rpm em tempos de moagem de 15 minutos. E variou-se a fração de clínquer em 2,5, 5 e 7,5 % do volume do tambor e a fração de corpos moedores foi mantida a 4 % da capacidade do tambor.

Estudo numérico

As simulações foram realizadas usando o DEM, que rastreia a trajetória individual de todas as partículas e considera as interações que ocorrem tanto entre elas quanto entre elas e as paredes rígidas dos equipamentos. Vale mencionar que nesse trabalho só foram realizadas as simulações com os corpos moedores, sem o clínquer, uma vez que a densidade e os diâmetros dos meios de moagem são muito maiores que os do clínquer. Consequentemente, a energia de colisões entre o meio de moagem e entre o meio de moagem e a parede é muito maior do que entre eles e o clínquer, e não afetará a trajetória do meio de moagem.

Todas as simulações foram realizadas usando o *software* aberto Liggghts®. Para o cálculo das forças normais e tangenciais usadas neste trabalho, foi utilizado o modelo de contato não-linear de Hertz-Mindlin. Para garantir a estabilidade o passo de tempo na simulação utilizado foi de 20% do tempo de Rayleigh, que consiste em uma função do módulo de cisalhamento do aço. Nas simulações deste trabalho, 1 passo de tempo correspondeu a aproximadamente 0,085 segundos.

Calibração dos parâmetros

De acordo com Coetzee (2016), uma das formas de se determinar os parâmetros a serem utilizados em uma simulação DEM é a variação desses parâmetros até que a resposta de alguma propriedade *bulk* obtida através da simulação corresponda ao resultado medido experimentalmente. Para se determinar os valores dos coeficientes de atrito estático, coeficientes de atrito de rolamento e restituição empregou-se, então, um planejamento composto central com 3 variáveis e duas réplicas no ponto central, totalizando 16 simulações. Para a definição dos níveis do planejamento, utilizaram-se parâmetros encontrados na literatura para simulações de esferas de aço usando o DEM (Cleary et al., 2003; Cleary; Owen, 2019; Owen; Cleary, 2015).

As simulações de calibração foram analisadas com base nas análises dos pontos de *shoulder* e *toe* da carga moedora. O objetivo foi obter o ângulo desses pontos mais próximo dos experimentais para, assim, encontrar os valores

dos parâmetros e utilizá-los nas simulações subsequentes. Em todas as simulações utilizou-se o módulo de cisalhamento de $3,57 \times 10^6$ Pa, o módulo de Young de 5×10^6 e a razão de Poisson de 0.2 (Brandao et al., 2020).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de avaliar a classificação granulométrica final do clínquer para o tambor operando em diferentes condições operacionais, foi determinado o diâmetro médio de Sauter das partículas após a moagem. O diâmetro médio inicial das partículas era de 0,87 mm. A Tabela 2 apresenta os resultados do primeiro planejamento fatorial, em que a fração de corpos moedores foi mantida constante, em 4% do volume do tambor.

Tabela 2: Resultados da moagem para o primeiro planejamento

Fração de clínquer (%)	Velocidade (rpm)	Diâmetro (mm)
2,5	15	0,26994
2,5	31	0,19610
2,5	47	0,19826
5	15	0,25337
5	31	0,23773
5	47	0,22450
7,5	15	0,42852
7,5	31	0,25516
7,5	47	0,27585

Analisando a Tabela 2, observa-se que, quando a fração de clínquer dentro do tambor é mais baixa, sendo mantida a fração de corpos moedores, menores são os diâmetros médios de Sauter do clínquer nas velocidades de 31 e 47 rpm. Isto decorre de que quanto menos clínquer em relação à quantidade de esferas de aço, maior é a probabilidade de colisões efetivas, resultado do contato entre o material e a carga moedora. No entanto, na velocidade de 15 rpm, o comportamento não foi como para outras velocidades, sendo que a condição com fração de clínquer de 5% apresentou diâmetro médio de Sauter menor do que a condição com apenas 2,5% de fração de clínquer. Como a velocidade é a principal variável que altera o regime de escoamento no interior do tambor, essa diferença pode estar ligada à mudança de

regime que deve ser investigada pelas simulações DEM.

Além disso, ao avaliar o efeito da velocidade de rotação, após os 15 minutos de moagem, observa-se que o aumento da velocidade de rotação de 31 para 47 rpm não promoveu uma melhora efetiva na moagem quanto o aumento de 15 para 31 rpm. No geral, notou-se uma diminuição do diâmetro médio de Sauter ao longo do tempo. Isso era esperado, uma vez que a moagem promove a redução do tamanho das partículas. Os resultados comprovam a necessidade de se avaliar a dinâmica dos corpos moedores, o que foi, então, realizado através das simulações.

Simulações usando o DEM

A simulação da quebra das partículas de clínquer requer conhecimentos de balanços populacionais e cinética de quebra de partículas, fugindo do escopo deste trabalho. Assim como mostrado por Rodriguez et al. (2018), a simulação com presença apenas dos corpos moedores, a princípio, o meio de moagem apresenta o mesmo comportamento de colisão apresentado nas simulações com minério. Por isso, foi avaliado exclusivamente a dinâmica dos corpos moedores dentro do equipamento.

Para calibração das variáveis de entrada do modelo, foram realizadas 16 simulações e os valores simulados dos ângulos de *shoulder* e *toe* foram comparados com dados experimentais. Verificou-se que a simulação com coeficiente de atrito estático de 0,7, coeficiente de restituição de 0,3 e coeficiente de atrito de rolamento de 0,05 correspondeu melhor aos ângulos experimentais. Um ângulo de *toe* e *shoulder* de $231,5^\circ$ e $26,5^\circ$, respectivamente, foi observado experimentalmente e através desta simulação. Esses parâmetros foram utilizados para as simulações posteriores do presente trabalho.

Foi avaliada, inicialmente, a dinâmica dos corpos moedores dentro do moinho de bolas, analisando-se o efeito da velocidade de rotação. A partir da simulação DEM, pôde-se obter dados sobre o número e a intensidade de colisões entre corpos moedores, assim como as forças de impacto dessas colisões, como demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4: Dados da média de colisões entre os corpos moedores para 100 time-steps

Velocidade (rpm)	Número de colisões	Força de colisão (N)
15	70	0,871
31	43	0,756
47	33	0,934

Analisando a Tabela 4, para a velocidade de 15 rpm, há mais colisões entre os corpos moedores se comparado às demais velocidades. Esse resultado não era esperado quando se compara ao diâmetro obtido no final das moagens (Tabela 2). Devido aos maiores diâmetros das partículas obtidas na velocidade de 15 rpm, esperava-se que houvesse menos colisões entre as partículas. Esperava-se também que, quanto maior a velocidade de rotação, maiores seriam as forças de impacto entre as partículas. No entanto, observou-se que as forças de colisões foram maiores para 15 e 47 rpm. Diante desse resultado, analisaram-se então o número e as forças de colisões entre os corpos moedores e a parede do moinho, que são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Dados da média de colisões entre os corpos moedores e as paredes do moinho para 100 time-steps

Velocidade (rpm)	Número de colisões	Força de colisão (N)
15	63	1,059
31	55	1,026
47	47	1,261

Pode-se notar na Tabela 5 que o número de colisões entre os corpos moedores e a parede é maior para a velocidade de 15 rpm, enquanto a maior força de colisão é para a velocidade de 47 rpm. Para maior compreensão dos resultados mencionados acima, é necessário o entendimento dos diferentes comportamentos dos corpos moedores ao longo do tempo no experimento. Para isso, a Figura 3 apresenta as imagens geradas nas simulações computacionais em que a fração de corpos moedores foi mantida constante, em 4% do volume do tambor e variou-se a velocidade de rotação do moinho.

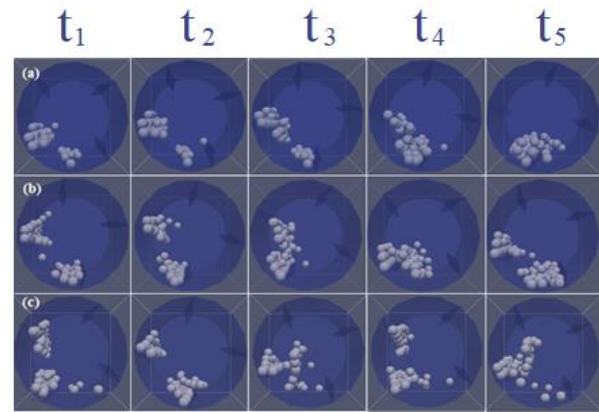


Figura 3: Imagens obtidas das simulações para as velocidades de (a) 15 (b) 31 e (c) 47 rpm

A partir da Figura 3 (a), pode-se perceber que na velocidade de 15 rpm, a quantidade de partículas lançadas pelos suspensores é maior e, logo, há mais material em queda. Consequentemente, nessa velocidade, há maior número de colisões entre os corpos moedores e dos corpos moedores com a parede. Apesar de esse número de colisões ser mais alto, as forças entre elas são menores, fato este justificado devido ao amortecimento causado pelo primeiro contato com os corpos moedores antes da parede, como mostrado em t_4 da Figura 3 (a). Isso não ocorre nas velocidades de 47 rpm (Figura 3 (b)) e de 31 rpm (Figura 3 (c)), visto que a queda dos corpos moedores ocorre de forma mais espaçada. Além disso, a menores velocidades, as partículas alcançam pontos de *shoulder* mais baixos, antes de sua queda, diminuindo o caminho percorrido pelo corpo moedor antes de sofrer o impacto. Como resultado, têm-se, então, uma menor energia no impacto. Esses dois fatos aliados explicam o resultado da Tabela 2, em que a moagem, ao se trabalhar com 15 rpm, é menos eficiente do que nas outras velocidades, apesar do maior número de colisões entre os corpos moedores e as maiores forças entre eles.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que o movimento das partículas influencia diretamente na granulometria do produto final. Neste trabalho, em que não se utilizou o leito completamente preenchido com partículas, o aumento da velocidade de rotação não levou às maiores taxas de moagem. Foi possível observar que, ao

se trabalhar com 15 rpm, obtiveram-se as menores taxas de moagem, havendo um incremento destas quando se passou a trabalhar com 31 rpm. Porém, vale ressaltar que esse mesmo incremento não foi notado ao mudar para a velocidade de 47 rpm. Esses resultados foram comparados com o número e a intensidade das colisões, analisados através do DEM.

Observou-se que o número e as forças de colisões entre os corpos moedores e destes com o tambor são influenciadas pelas velocidades de rotação do moinho. O número de colisões, tanto entre os corpos moedores quanto entre os corpos moedores e a parede, é inversamente proporcional à velocidade. De um modo geral, analisando o efeito sobre o diâmetro das partículas, é plausível atribuir que a maior parte das colisões efetivas para a moagem são das colisões entre as esferas moedoras e não delas com as paredes.

Comparando os resultados das forças e intensidade de colisões através do DEM, observou-se que nem sempre as simulações com maiores números de colisões levaram às maiores taxas de moagem. Através da análise dos regimes de escoamento do leito, foi possível, então, observar a influência do regime na granulometria final, assim como explicar as forças de colisões em cada condição simulada, relacionando com os testes de moagem.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. L. A. de et al. (2002), Desenvolvimento e perspectivas da indústria de cimento, BNDES Setorial, Vol15, p. 35-62.
- BRANDAO, R. J. et al. (2020), Experimental study and DEM analysis of granular segregation in a rotating drum, Powder Technology, Vol 364, p. 1-12.
- CAMALAN, M.; HOŞTEN, Ç. (2015), Ball-mill grinding kinetics of cement clinker comminuted in the high-pressure roll mill, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Vol 36, p. 310-316.
- CARVALHO, R.; TAVARES, L. (2014), A mechanistic model of SAG mills, IMPC - XXVII International Mineral Processing Congress, p. 1-12.
- CLEARY, P. W. et al. (2003), Comparison of DEM and experiment for a scale model SAG mill, Int. J. Miner. Process. Vol 68, p. 129-165.
- CLEARY, P. W.; OWEN, P. (2019), Effect of operating condition changes on the collisional environment in a SAG mill, Minerals Engineering Vol 123, p. 297-315.
- COETZEE, C. J. (2016), Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape, Powder Technology. Vol 297, p. 50-70.
- CUNDALL P.A.; STRACK O. D. L. (1979), A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol 29, p. 47-65.
- CUNHA, R. N. et al. (2016), Repose angle of monoparticles and binary mixture: An experimental and simulation study, Powder Technology, Vol 303, p. 203-211.
- DATTA, A.; RAJAMANI, R. J. (2002), A direct approach of modeling batch grinding in ball mills using population balance principles and impact energy distribution, Int. J. Miner. Process., Vol 64, p. 181– 200.
- FIGUEIRA, H. V. O. et al. (2004), Cominuição, Comunicação técnica elaborada para a 4ª edição do livro de Tratamento de Minérios, Vol 4, p. 94-113.
- HARDER, J. (2003), Advanced grinding in the cement industry, ZKG International, Vol 56, p. 31-42.
- JANKOVIC, A. et al. (2004), Cement grinding optimization, Minerals Engineering, Vol 17, p.1075-1081.
- KING, R. P.; BOURGEOIS, F. (1993), A new conceptual model for ball milling. Proc, XVIII International Mineral Processing Congress, p.81-86.
- LEE, H. et al. (2019), Analysis of grinding kinetics in a laboratory ball mill using population-balance-model and discrete-element-method, Advanced Powder Technology, Vol 30, p. 2517-2526.
- MELLMANN J. (2001), The transverse motion of solids in rotating cylinders - forms of motion and transition behavior, Powder technology, Vol 118, p. 251-270.

- METZGER, M. J., GLASSER, B. J. (2013), Simulation of the breakage of bonded agglomerates in a ball mill, *Powder Technology*, Vol 237, p. 286-302.
- MISHRA, Ratan K. et al. (2015), En route to multi-model scheme for clinker comminution with chemical grinding aids, *Advances in Applied Ceramics*, Vol 114, p. 393-401.
- POWEEL, M. S.; MCBRIDE, A. T. (2004), A three-dimensional analysis of media motion and grinding regions in mills, *Minerals Engineering*, Vol 17, p. 1099-1109.
- OWEN, P.; CLEARY, P. W. (2015), The relationship between charge shape characteristics and fill level and lifter height for a SAG mill, *Minerals Engineering*, Vol 83, p. 19-32.
- RADZISZEWSKI, P.; ALLEN, J. (2014), Towards a better understanding of stirred milling technologies – Estimating power consumption and energy use, 46th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference. Ottawa, p. 55-66.
- RAMOS, E. S. et al. (2011), Simulação do movimento da carga em moinhos de bolas utilizando o método dos elementos discretos. XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, p. 440- 447.
- REZAEIZADEH, M. et al. (2010), Experimental observations of lifter parameters and mill operation on power draw and liner impact loading, *Minerals Engineering*, Vol 23, p. 1182-1191.
- ROCHA, S. D. F. et al. (2011), Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Vol 16, p. 1-10.
- RODRIGUEZ, V. A. et al. (2018), Insights into advanced ball mill modelling through discrete element simulations, *Minerals Engineering*, Vol 127, p. 48-60.
- SILVÉRIO, B. C. et al. (2014), Effect of the friction, elastic, and restitution coefficients on the fluid dynamics behavior of a rotary dryer operating with fertilizer, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol 53, p. 8920-8926.
- SRIDHAR C. S. et al. (2016), Grinding kinetics, modeling, and subsieve morphology of ball mill grinding for cement industry ingredients, *Particulate Science and Technology*, Vol 34, p. 1-8.
- TAVARES, L. M.; CARVALHO, R. M. (2009), Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills, *Minerals Engineering*, Vol 22, p. 650-659.
- TUZCU, E. T., RAJAMANI, R. (2011), Modeling breakage rates in mills with impact energy spectra and ultra fast load cell data, *Minerals Engineering* Vol 24, p. 252-260.
- VARELA, N.; VIEIRA, F. S. (2005), Cimento: Uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas, I Congresso Nacional de Argamassas de Construção, p. 1-11.
- WEERASEKARA N. S. et al. (2013), The contribution of DEM to the science of comminution, *Powder Technology*, Vol 248, p. 3-24.