



AMANDA APARECIDA DE LIMA SANTOS

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO DA
INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO E DA
FRAÇÃO DE MATERIAL NA MOAGEM DE CLÍNQUER EM
MOINHO DE BOLAS**

LAVRAS – MG

2019

AMANDA APARECIDA DE LIMA SANTOS

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA
VELOCIDADE DE ROTAÇÃO E DA FRAÇÃO DE MATERIAL NA MOAGEM DE
CLÍNQUER EM MOINHO DE BOLAS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Engenheira Química.

Prof^a. Dr^a. Suellen Mendonça Nascimento
Orientadora

**LAVRAS – MG
2019**

AMANDA APARECIDA DE LIMA SANTOS

**ESTUDO EXPERIMENTAL E DE SIMULAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA
VELOCIDADE DE ROTAÇÃO E DA FRAÇÃO DE MATERIAL NA MOAGEM DE
CLÍNQUER EM MOINHO DE BOLAS
EXPERIMENTAL AND SIMULATION STUDY OF THE INFLUENCE OF
ROTATION SPEED AND MATERIAL FRACTION ON CLINKER GRINDING IN
BALL MILL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Engenheira Química.

APROVADA em 09 de dezembro de 2019.

Prof. Dr. Tiago José Pires de Oliveira UFLA
Prof^a. Dr^a. Isabele Cristina Bicalho UFLA

Prof^a. Dr^a. Suellen Mendonça Nascimento
Orientadora

**LAVRAS – MG
2019**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que me permitiu chegar até aqui. Agradeço a Ele por me dar forças, iluminar o meu caminho e estar sempre ao meu lado, guiando os meus passos.

Agradeço a Deus pela família maravilhosa que tenho ao meu lado. Aos meus pais amados, Caroline e Luciano, por confiarem em mim, pelos conselhos maravilhosos, por estarem sempre ao meu lado, me motivarem e por todo carinho. Aos demais familiares, pelo amor e por toda a torcida.

Agradeço ao meu noivo, Felipe, que esteve presente durante toda a minha graduação ao meu lado, fortalecendo minhas energias, torcendo por mim, me motivando e me amparando.

Aos meus amigos da graduação: Carol, Geraldo, Marcela, Nathiele e Nayara, pela amizade, por todos os momentos vividos, por sempre me ajudarem quando solicitados e por tornaram essa trajetória mais descontraída.

À minha amiga Amanda, pela amizade e companheirismo durante a graduação inteira e durante a realização desse trabalho. Obrigada por completar minha vida com essa amizade incrível e linda que construímos.

À minha orientadora, Suellen, meu muito obrigada pela confiança em mim depositada, pela paciência, por sempre estar disponível para me auxiliar, compartilhar seus conhecimentos e pela dedicação neste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia pelo empréstimo dos corpos moedores, utilizados no presente trabalho. E também a Intercement pelo material de clínquer cedido. A contribuição deles foi essencial para a execução do trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Engenharia, e aos professores da Engenharia Química, que contribuíram para minha formação, com grande empenho e dedicação, através dos conhecimentos compartilhados e ensinamentos passados.

Deixo aqui, meu muito obrigada, de todo coração. A ajuda de vocês foi fundamental para a realização desse trabalho.

RESUMO

Uma das indústrias que está apresentando constante crescimento é a de cimento. Este fato é justificável devido ao aumento de verbas do governo destinados a programas habitacionais, a busca dos cidadãos pela casa própria e a inserção de grupos brasileiros no mercado externo. O cimento é resultado da moagem fina de vários componentes, sendo o clínquer o seu majoritário. O processo de moagem de clínquer é uma operação importante, pois interfere na qualidade do produto. É a etapa de fabricação do cimento que mais consome energia, cerca de 30 a 70% da energia total. Nas indústrias, para realizar a moagem utiliza-se moinho de bolas, devido sua simplicidade operacional. Esse equipamento constitui-se por um tambor horizontal que realiza movimento rotatório ao redor do seu próprio eixo e possui em seu interior corpos moedores que permitem a quebra das partículas. Dessa maneira, a fim de avaliar a influência da velocidade de rotação do moinho e da fração de enchimento do material na moagem de clínquer, realizou-se experimentos variando-se as velocidades em 15, 31 e 47 rpm e as frações de enchimento do material a ser moído em 2,5, 5 e 7,5% do volume do tambor. Além disso, foram feitas simulações utilizando a Abordagem Lagrangeana e empregando o Método dos Elementos Discretos para verificar o comportamento dos corpos moedores no interior do moinho e calcular as forças atuantes sobre as partículas. Como resultados obteve-se que, ao decorrer do tempo da operação de moagem, o diâmetro médio das partículas sofreu uma redução, conforme esperado. No entanto, observou-se que para velocidade de rotação intermediária e menor fração de enchimento, obtêm-se menores diâmetros, devido ao maior contato das esferas moedoras com o clínquer. Além disso, a simulação foi capaz de representar bem o comportamento dos corpos moedores no interior do moinho, sendo possível observar o regime de catarateamento das bolas esféricas. Como esperado, a velocidade de 47 rpm apresentou maior força de colisões partícula-parede. Já a velocidade de 15 rpm apresentou um comportamento inesperado, apresentando as maiores forças e número de colisões partícula-partícula. Demonstrando assim, que mesmo o número de colisões entre os corpos moedores e a força de colisões serem grandes, não traduz na obtenção do menor diâmetro. Os diâmetros para as velocidades de 31 e 47 rpm se aproximaram devido ao comportamento dos corpos moedores, e suas distâncias que queda no interior do moinho. De maneira geral, o presente trabalho permitiu a compreensão de conceitos acerca da moagem e aprimoração do conhecimento, além de salientar a importância da simulação para compreensão da dinâmica das cargas, construção e resolução de problemas da engenharia.

Palavras-chave: Moagem. Produção de cimento. DEM.

ABSTRACT

One of the industries that is showing constant growth is cement. This fact is justifiable due to the increase in government funds allocated to housing programs, the search of citizens for their own homes and the insertion of Brazilian groups in the foreign market. Cement is the result of fine grinding of various components, with clinker being the majority. The clinker grinding process is an important operation because it interferes in the quality of the product. And it is the cement manufacturing stage that consumes the most energy, about 30 to 70% of the total energy. In industries, ball mills are used for grinding, due to their operational simplicity. This equipment consists of a horizontal drum that rotates around its own axis and has inside grinding bodies that allow the particles to break. Thus, in order to evaluate the influence of the mill rotation speed and the filling fraction of the material in the clinker grinding, experiments were performed varying the speeds at 15, 31 and 47 rpm and the filling fractions of the material to be ground in 2.5, 5 and 7.5% of the drum volume. In addition, simulations were performed using the Lagrangean Approach and using the Discrete Element Method to verify the behavior of the grinding bodies inside the mill and calculate the forces acting on the particles. As results it was obtained that, during the time of the grinding operation, the average diameter of the particles suffered a reduction, as expected. However, it was observed that for intermediate rotation speed and smaller filling fraction, smaller diameters are obtained due to the greater contact of the grinding balls with the clinker. In addition, the simulation was able to well represent the behavior of the grinding bodies inside the mill, being possible to observe the cataracting regime of the ball balls. As expected, the speed of 47 rpm showed greater strength of particle-wall collisions. On the other hand, the speed of 15 rpm presented an unexpected behavior, presenting the highest forces and number of particle-particle collisions. Thus, demonstrating that even the number of collisions between the grinding bodies and the collision force are large, does not translate into obtaining the smallest diameter. The diameters for velocities of 31 and 47 rpm approached due to the behavior of the grinding bodies, and their distances that fall inside the mill. In general, the present work allowed the understanding of concepts about grinding and knowledge improvement, besides highlighting the importance of simulation to understand load dynamics, construction and engineering problem solving.

Keywords: Grinding. Cement production. DEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processo de fabricação do cimento Portland.....	4
Figura 2.2 – Métodos de fratura.	5
Figura 2.3 – Mecanismos de fratura, energia aplicada e distribuição granulométrica.	6
Figura 2.4 – Microprocessos de moagem.....	7
Figura 2.5 – Dinâmica das partículas dentro do moinho.....	10
Figura 2.6 – Representação do fenômeno de catarateamento.	12
Figura 2.7 – Peneiramento realizado em escala laboratorial.	14
Figura 3.1 – Módulo experimental utilizado nos testes.....	19
Figura 3.2 – Interior do tambor cilíndrico.	20
Figura 3.3 – Amostra das bolas de aço utilizadas no experimento.	20
Figura 3.4 – Amostra de clínquer cedida pela InterCement.....	21
Figura 3.5 – Amostras do material de clínquer antes do processo de moagem.....	22
Figura 3.6 - Malha computacional do tambor cilíndrico.	25
Figura 3.7 – Obtenção do ângulo shoulder para a simulação 7 e para o ensaio experimental.	27
Figura 3.8 – Obtenção dos ângulos de toe para a simulação 7 e para o ensaio experimental...27	
Figura 4.1 – Diâmetros das partículas de clínquer.	28
Figura 4.2 – Imagens obtidas da moagem de clínquer após (a)5, (b)10 e (c)15 minutos de operação para o experimento com 7,5% de enchimento de material e velocidade de rotação equivalente a 47 rpm.....	30
Figura 4.3 – Imagens obtidas da moagem de clínquer após 15 minutos de operação equivalentes a (a)2,5%, (b)5% e (c)7,5% de enchimento de material para a velocidade de rotação de 15 rpm.....	31
Figura 4.4 – Imagens obtidas da moagem de clínquer após 15 minutos de operação com 2,5% de enchimento de material nas velocidades de rotação de (a)15 rpm, (b)31 rpm e (c)47 rpm.....	31
Figura 4.5 – Superfície de resposta para o diâmetro médio de Sauter, após 5 minutos de moagem.	33
Figura 4.6 – Superfície de resposta para o diâmetro médio de Sauter, após 10 minutos de moagem.	34
Figura 4.7 – Superfície de resposta para o diâmetro médio de Sauter, após 15 minutos de moagem.	34
Figura 4.8 – Comparação entre os resultados simulados para as velocidades de rotação de (a)15	

(b)31 e (c)47 rpm e os resultados experimentais para as velocidades de rotação de (a')15, (b')31 e (c')47 rpm.	37
Figura 4.9 – Número de colisões partícula-partícula.....	38
Figura 4.10 – Força de colisões partícula-partícula.....	39
Figura 4.11 – Número de colisões partícula-parede.....	40
Figura 4.12 – Força de colisões partícula-parede.....	40
Figura 4.13 – Imagens obtidas a partir das simulações em cinco intervalos para os tempos de moagens equivalentes a (a) 15 rpm, (b) 31 rpm e (c) 47 rpm representados na horizontal.	41
Figura 4.14 – Comparação dos regimes das simulações realizadas para diferentes velocidades (a) 15 rpm, (b) 31 rpm e (c) 47 rpm.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores utilizados para as esferas moedoras.	21
Tabela 3.2 – Combinações estatística obtidas pelo planejamento fatorial.	23
Tabela 3.3 – Valores dos parâmetros encontrados na literatura.	26
Tabela 3.4 – Combinações estatística obtidas pelo planejamento composto central.	26
Tabela 4.1 – Diâmetro médio de Sauter para os tempos de 5, 10 e 15 minutos.....	29
Tabela 4.2 – Diâmetro médio de Sauter para o tempo de 15 minutos para a amostra de 100 gramas e para a amostra com o peso total de clínquer da moagem.	32
Tabela 4.3 – Valores ideais para cada tempo de moagem.....	35
Tabela 4.4 – Coeficientes utilizados.....	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 Fabricação de cimento	3
2.2 Moagem	4
2.2.1 Métodos de fratura	5
2.2.2 Moinho de bolas	6
2.2.3 Variáveis do processo	8
2.2.4 Dinâmica da carga	9
2.2.4.1 Regime de deslizamento	10
2.2.4.2 Regime de avalanche	11
2.2.4.3 Regime de rolamento.....	11
2.2.4.4 Regime de cascadeamento	11
2.2.4.5 Regime de catarateamento.....	11
2.2.4.6 Regime de centrifugação	12
2.2.5 Condições de Operação de Moinho de Bolas	13
2.3 Peneiramento e análise granulométrica	13
2.4 Porosidade e massa específica de um material	14
2.5 Abordagem numérica.....	15
2.5.1 Abordagem Lagrangeana	15
2.5.2 Modelo de Hertz – Mindlin.....	16
2.5.3 Calibração de parâmetros de contato.....	17
2.5.4 Time-step.....	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 Módulo experimental	19
3.2 Carga moedora	20
3.3 Material de estudo	21
3.4 Planejamento estatístico de experimentos.....	22
3.5 Moagem de clínquer	23
3.6 Análise granulométrica do clínquer após a moagem	24
3.7 Metodologia numérica.....	24
3.7.1 Elaboração da malha e programa para simulação.....	24
3.7.2 Calibração	25

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Caracterização do clínquer e velocidade crítica de moagem.....	28
4.2 Determinação do diâmetro inicial do material	28
4.3 Diâmetro médio de Sauter	29
4.4 Peneiramento total das partículas.....	32
4.5 Análise estatística.....	32
4.6 Calibração	36
4.7 Simulações usando o DEM	36
4.7.1 Número de colisões e forças de colisões	36
4.7.2 Regime de escoamento.....	42
5 CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, uma das indústrias que mais cresceu foi a de cimento, que elevou consideravelmente sua produção, quando comparado com indústrias como de petróleo, gasolina, óleo diesel, óleo combustível, álcool, gás natural, carvão vegetal e alumínio (SOUZA, 2007). Isso é conveniente ao aumento da demanda por cimento em conformidade com o apoio do governo em programas habitacionais, como “Minha Casa, Minha Vida”, e o rápido avanço industrial internacional de grupos brasileiros como Votorantim, Camargo Corrêa e CSN visando ingressar suas produções de cimento em mercados externos (SANTOS, 2011). Sabendo-se que essa produção depende de algumas variáveis e dos seus constituintes, e que um dos seus principais constituintes é o clínquer, é de extrema importância conhecer e melhorar o seu processamento para garantir que o cimento atenda às suas especificações.

Segundo Centurione (1999), o clínquer é um produto composto por cal, alumina, sílica e óxido de ferro. Além desses compostos, pode-se ter minério de ferro, areia, bauxita, e outros constituintes adicionados como aditivos, para correção das proporções adequadas. Isso deve ser feito pois raramente os constituintes do clínquer são encontrados em uma única rocha já nas proporções desejáveis.

Além das quantidades corretas de matérias-primas deve-se atentar também para a moagem delas, pois é um fator que interfere no desenvolvimento das reações de clinquerização e, conseqüentemente, na qualidade do produto (ZEMPIERI, 1989 *apud* CENTURIONE, 1999). A moagem é responsável por diminuir a dimensão das partículas para se obter a granulometria adequada do material para posteriores processamentos e para simplificar seu transporte e seu manejo (MACHADO, 2016).

A moagem de clínquer é a etapa do processo de fabricação do cimento que mais consome energia (RIBEIRO, 2004). Devida a alta demanda energética dessa operação, busca-se reduzir a energia consumida através de operação em condições ótimas e ganhos no aproveitamento energético, para apresentar economia no processo como um todo. Para isso, é necessário ter conhecimento detalhado dos mecanismos que regem a moagem (LIMA, 2018).

Para realizar a moagem nas indústrias, utiliza-se com grande frequência tambores rotatórios devido a sua simplicidade operacional. Ele é um equipamento considerado excelente para processos de granulação, secagem de matérias, moagem, dentre outros (TJAKRA et al., 2012 e SCATENA et al., 2014 *apud* GRAVENA et al., 2019).

Um dos moinhos mais utilizados é o de bolas que se constitui por um tambor horizontal que realiza movimento rotatório ao redor do seu próprio eixo. Além do tambor, este moinho é

constituído por uma carga moedora, esféricas ou cilíndricas, presentes no seu interior que proporcionam os fenômenos de quebra e movimentos das partículas, podendo estes afetar a eficiência da moagem (MACHADO, 2016). A finura e a distribuição das partículas afetam o comportamento reológico e desempenho mecânico do cimento, esse é mais um motivo que demonstra a importância da moagem na fabricação deste produto (CENTURIONE,1999).

As simulações computacionais estão sendo empregadas, de maneira crescente, para se fazer um estudo e auxiliar na compreensão do movimento dos corpos moedores em diferentes operações, como moagem, secagem, entre outras (MACHADO, 2016). Um método que vem sendo amplamente utilizado, é o Método dos Elementos Discretos (DEM – *Discrete Element Method*), que utiliza a abordagem Lagrangeana. Este método, de acordo com Machado (2016), faz uso de leis de interação partícula-partícula e leis de contato entre as partículas e a parede do tambor para estudar a atuação de cada partícula, de maneira individual, na moagem.

Com base nisso, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência de duas variáveis envolvidas na moagem de clínquer, a velocidade de rotação do moinho e a fração de enchimento do material a ser moído, através de testes experimentais. Além disso, realizar simulações empregando a abordagem DEM para verificar o comportamento dos corpos moedores no interior do moinho, de forma a complementar os estudos experimentais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico serão apresentados os embasamentos teóricos a respeito da moagem de clínquer, bem como o equipamento utilizado para realizar o processo, o comportamento da carga moedora no seu interior, variáveis que interferem na operação e a abordagem numérica utilizada para implementar os estudos por meio da simulação computacional.

2.1 Fabricação de cimento

Segundo Zampieri (1993, p. 10), “o termo cimento é utilizado para designar materiais particulados que ao serem misturados com água, originam misturas plásticas, as quais após algum tempo se solidificam e adquirem resistência mecânica”.

O cimento Portland é muito utilizado nas construções civis como elemento de concretagem, de ligação e elementos estruturais. Desde o início do século XX o cimento apresenta-se como uma solução econômica para as obras de engenharia, além de amenizar os problemas de moradia da civilização atual (MAURY; BLUMENSCHHEIN, 2012).

O termo cimento Portland foi introduzido pela patente de Aspdin em 1824, esse nome é graças à semelhança entre o cimento endurecido e a pedra de Portland, um calcário usado em construções na Inglaterra (NEVILLE, 1982 *apud* ZAMPIERI, 1993). O cimento Portland possui características de moldabilidade, elevada resistência aos esforços e suas matérias-primas podem ser consideradas abundantes e disponíveis na natureza, fato que justifica sua imensa utilidade em todo o mundo e impacta, conseqüentemente, a qualidade de vida das populações (MAURY; BLUMENSCHHEIN, 2012; DE LIMA, 2011).

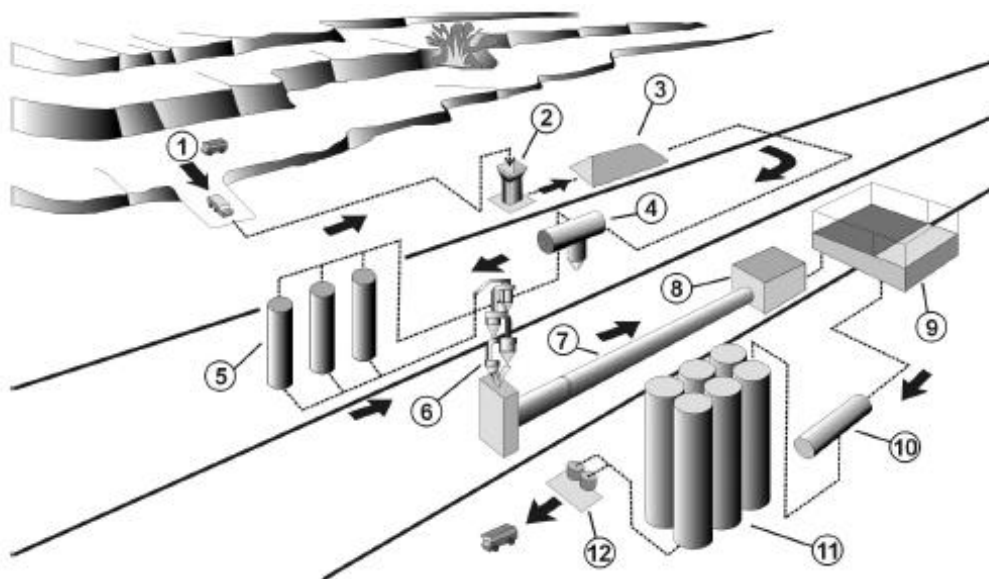
O clínquer Portland, material de cor cinza e extremamente poroso, é o produto do procedimento de sinterização que consiste na mineração e britagem das matérias-primas, preparação da mistura crua, denominada farinha, e queima em um forno rotativo com temperatura elevada, de 1350 a 1500°C (SOUZA, 2002). Após a moagem e mistura em proporções adequadas de calcário, argilas e componentes corretivos de ferro e alumínio, têm-se o cimento Portland (SOUZA, 2002; GOBBO, 2003).

De acordo com De Lima (2011, p. 30), “é da composição química e cristalina do clínquer que derivam as propriedades aglomerantes e hidráulicas dos diferentes tipos de cimentos”. Conforme o produto desejado, faz-se adições de materiais em diferentes proporções (MEHTA; MONTEIRO, 2001). Devido a isso, os cimentos são apresentados sob forma de diversas misturas que oferecem a ele características específicas para sua aplicação (DE LIMA, 2011).

Segundo Oliveira (2012), o tipo de cimento Portland depende da quantidade de aditivos adicionados e da finura do material. E ambos influenciam na resistência e na qualidade do produto.

De maneira simplificada, o processo de fabricação do cimento Portland, como demonstrado na Figura 2.1, pode ser dividido em algumas etapas. Inicialmente, faz-se a mineração (1), britagem (2), pré-homogeneização (3) e moagem das matérias-primas (4). Após isso, a farinha é armazenada em silos (5), e, conseguinte, passa por um pré-aquecedor (6) e pelo forno rotativo (7) onde o material moído sofre várias reações para formar os silicatos alitas e belitas e, posteriormente, de aluminatos. Além disso, o material passa por um resfriamento (8) para ser armazenado (9) e em seguida, passa pelo moinho de clínquer (10), onde ocorre as adições de substâncias. Por fim, o cimento é armazenado em silos (11) e é despachado (12) (GOBBO, 2009).

Figura 2.1 – Processo de fabricação do cimento Portland.



Fonte: Gobbo (2009) adaptada de Kihara et al. (1990).

O clínquer, quando reduzido a pó, contém uma série de compostos, dos quais os principais são: alita ou silicato tricálcico (Ca_3SiO_5 ou $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), belita ou silicato dicálcico (Ca_2SiO_4 ou $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ou $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) e aluminoferrito tetracálcico ou ferrita ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ ou $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) (GRANDE, 2003).

2.2 Moagem

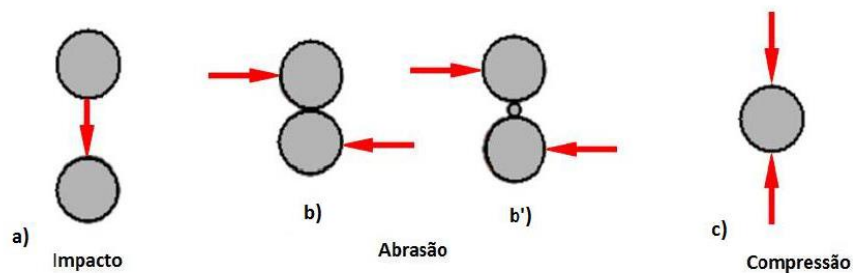
Segundo Souza (2007, p. 34), “para a indústria de cimento, a moagem, é necessária para

agregar qualidade ao produto, fornecendo resistência e reatividade às partículas”.

2.2.1 Métodos de fratura

A moagem é um processo no qual reduz-se o tamanho de um material sólido por meio da fratura das partículas. O resultado desse processo são fragmentos com variados tamanhos e formas. A quebra do material depende da intensidade e da maneira como o esforço é aplicado nas partículas. Essa quebra pode ocorrer pelos mecanismos de impacto, abrasão e compressão, conforme ilustrado na Figura 2.2 (MACHADO, 2016; CARVALHO, 2006). Além disso, a granulometria inicial do material e a dureza de cada partícula interferem na evolução do grau de moagem (RIBEIRO; ABRANTES, 2001).

Figura 2.2 – Métodos de fratura.



Fonte: Machado (2016) adaptada de Foggiatto (2009).

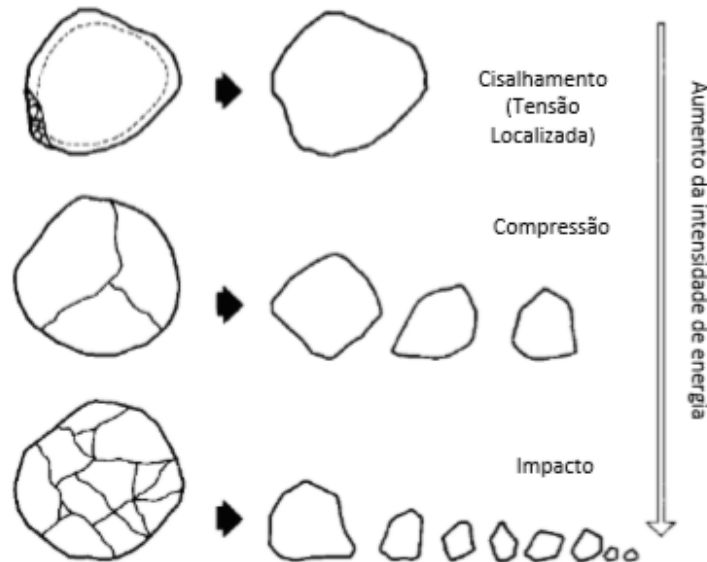
A atrição do material com o próprio, com a carga moedora e com as paredes do equipamento corresponde ao mecanismo denominado abrasão. Nesse mecanismo, a força é insuficiente para gerar fratura em toda a partícula. Assim, ocorre a concentração de forças na área periférica da partícula que provocam o aparecimento de pequenas fraturas superficiais, responsáveis por gerarem partículas finas e pequena diminuição de tamanho da partícula original (MACHADO, 2016; RIBEIRO, 2004; FOGGIATTO, 2009).

As partículas que são comprimidas entre partículas maiores correspondem ao mecanismo de compressão. A força é inserida de forma lenta e embora seja superior à resistência da partícula, gera fragmentos de tamanhos grandes e em pequeno número (MACHADO, 2016; RIBEIRO, 2004; FOGGIATTO, 2009).

O mecanismo de fratura das partículas considerado mais eficiente é o de impacto. Neste mecanismo, a força é inserida de forma rápida e com intensidade muito superior à resistência da partícula. Ele gera grande quantidade de partículas de tamanho inferior se comparado à partícula original (MACHADO, 2016; RIBEIRO, 2004; FOGGIATTO, 2009). A Figura 2.3

demonstra os três tipos de mecanismos de fratura, energia aplicada e a distribuição granulométrica dos produtos da quebra.

Figura 2.3 – Mecanismos de fratura, energia aplicada e distribuição granulométrica.



Fonte: Ribeiro (2004) adaptada de Kelly e Spottswood (1982).

A distribuição granulométrica após a moagem é um fator de grande importância, pois interfere o desempenho dos produtos nas etapas subsequentes de seu processamento. A presença de partículas finas ou grossas em excesso podem causar diminuição na recuperação metalúrgica do mineral de interesse em processos como flotação, concentração gravítica e lixiviação, entre outros (FOGGIATTO, 2009).

2.2.2 Moinho de bolas

Existem diversos tipos de moinhos, como moinho de bolas, de barras, multicâmaras, de seixos, entre outros. Suas principais características são suas dimensões e potência aplicada. A potência efetiva do processo é afetada pelo nível de enchimento e porcentagem de sólidos alimentados, que interferem na eficácia da moagem, e também pela velocidade de rotação do tambor, que influencia o deslocamento do material no interior do moinho (FOGGIATTO, 2009).

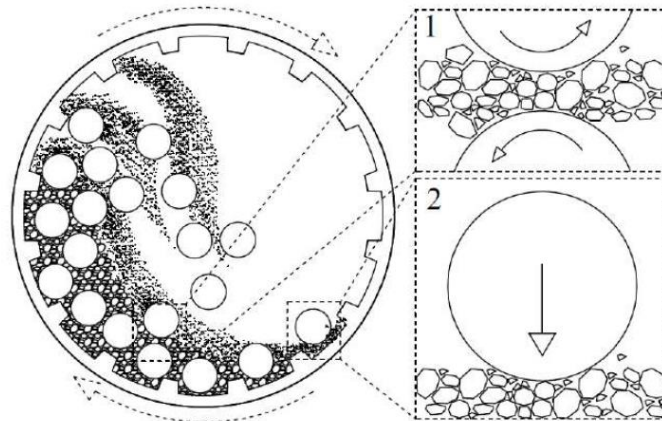
O moinho de bolas é um dos moinhos mais utilizados nos processos industriais, ele é utilizado nas indústrias de cimento, tinta e alimentícia, para moer compostos, pigmentos e trigo. Nesse moinho, a fragmentação das partículas ocorre devido a esforços realizados pelas esferas

sobre as partículas. A desvantagem desse tipo de moinho é devida sua incapacidade de aproveitar toda a energia em sua operação. Apenas uma parcela da energia cinética é aproveitada de fato na quebra das partículas. A outra, é perdida através de dissipação de energia cinética na forma de calor, ruído e outras perdas (MACHADO, 2016; RODRIGUEZ, 2016; JIMÉNEZ-HERRERA, 2017).

Esse tipo de moinho constitui-se por um tambor horizontal que executa movimento rotatório. Além do tambor, este moinho é constituído por uma carga moedora, bolas cilíndricas, no seu interior que proporcionam o fenômeno de fratura das partículas (MACHADO, 2016). O trabalho útil realizado pelos corpos moedores é dependente de sua geometria, do seu tamanho em relação ao tamanho do material a ser moído, do material que são construídos e da sua quantidade. Ao passar do tempo, os corpos moedores vão se desgastando devido ao movimento no interior moinho e por isso devem ser trocadas periodicamente (TAGGART, 1964 *apud* VON KRUGER, 2004).

No interior do moinho de bolas pode-se identificar a aplicação de esforços cisalhantes, causando abrasão (1), e a queda da carga moedora sobre o leito de partícula, que causam quebra por impacto (2). A Figura 2.4 ilustra esses dois microprocessos (NAPIER-MUNN et al., 1996 *apud* JIMÉNEZ-HERRERA, 2017).

Figura 2.4 – Microprocessos de moagem.



Fonte: Jiménez-Herrera (2017).

Segundo Taggart (1951 *apud* NUNES, 2012) a moagem é classificada em moagem grossa, intermediária e fina. A moagem grossa compreende o produto com tamanho entre 3,36 e 0,84 mm, na moagem intermediária o tamanho máximo é de 0,6 mm e na moagem fina o tamanho máximo é de 0,074 mm.

Na moagem pode ocorrer o processo de sobre moagem devido a fragmentação excessiva das partículas, em que há no moinho presença de grande quantidade de partículas finas, que

atrapalha o impacto entre as partículas maiores. Esta situação ocorre devido ao grande tempo de residência do material no interior do moinho e causa desperdício de energia no processo (MACHADO, 2016; RODRIGUEZ, 2016).

Para esse tipo de moinho, as condições usuais são 65% a 80% da velocidade crítica e de 35% a 40% do volume útil de bolas. Para baixas porcentagens de partículas, elas ficam muito distantes uma das outras e dos corpos moedores. Assim, aumenta-se o choque das bolas com o revestimento do moinho e diminui-se a ação delas sobre as partículas. Já para grande quantidade de partículas, prejudica-se o deslocamento das partículas e dos corpos moedores (CHAVES; PERES, 2012).

2.2.3 Variáveis do processo

A operação de moagem possui muitas variáveis que podem interferir em seu desempenho, como, por exemplo características do material: composição mineralógica, moabilidade, granulometria da matéria na alimentação e forma inicial das partículas. Além da heterogeneidade da alimentação e taxa de alimentação (KALLEMBACK, 2012).

As condições operacionais dos equipamentos também afetam o processo como, por exemplo (YOVANOVIC, 2006):

a) tamanho das bolas: Corpos moedores de tamanho maior, possuem maior energia de colisão e devido a isso garantem uma maior moagem. Porém, a certo grau de finura, elas não conseguem se chocar com as partículas. Em contrapartida, quanto menor o tamanho das bolas, mais colisões com a partícula pode-se ter, porém de menor intensidade. Como resultado, é necessário fazer a utilização de tamanho de bolas diferentes na operação. Ademais, como as bolas menores possuem baixa energia cinética e maior número de contatos, o tamanho ideal desse tipo de corpo moedor diminui com o aumento da velocidade do tambor para garantir maior quantidade de contato bola-material (NAPIER-MUNN et al., 1996 *apud* RODRIGUEZ, 2016; SHIN et al., 2013; YOVANOVIC, 2006);

b) nível de enchimento: Essa variável depende do tipo de material utilizado, quanto maior o nível de enchimento, mais colisões pode-se ter. Porém, essas colisões não são necessariamente colisões efetivas. O excesso de enchimento pode levar a um aumento do consumo da carga moedora e de energia. O valor ótimo de enchimento situa-se entre 9 e 29% do volume interno do moinho.

c) velocidade de rotação: Altas velocidades aumentam as colisões de alta energia pelo impacto. Baixas velocidades favorecem a quebra por abrasão. Existe um valor ótimo de

58 a 60% da velocidade crítica para obter o mínimo consumo de energia. Segundo Rodriguez (2016), o aumento dessa variável, leva a um aumento da quebra das partículas. Porém, ao se aproximar da velocidade crítica, a taxa de fragmentação diminui.

d) tipo de corpo moedor: De acordo com Cloos (1983 *apud* VON KRUGER, 2004) para garantir uma quebra efetiva e se ter uma área de contato adequada com o material a ser moído, é importante que o meio moedor seja o mais denso possível e tenha a maior área superficial. Porém, deve se balancear esses requisitos, visto que quanto mais pesado o corpo moedor individual, menor será sua quantidade, conseqüentemente, menor será a superfície total exposta ao material a ser moído. Bolas feitas com aço proporcionam maior energia cinética devido sua maior massa. Porém, a quantidade excessiva de corpos moedores é prejudicial à moagem, visto que diminuem a quantidade de energia na moagem. Isso ocorre pelo fato de diminuir o caminho percorrido pelo corpo antes de sofrer o impacto, diminuindo assim a energia no impacto. Mas uma quantidade de corpos muito pequena também é prejudicial, pois diminui a frequência de choques (FOGAGNOLO, 2000).

Além dessas variáveis, têm-se também outros fatores que influenciam a operação de moagem, são eles: tipo de processo via úmida ou via seca, tipo de circuito, aberto ou fechado e movimento da carga no interior do moinho (LIMA, 2018).

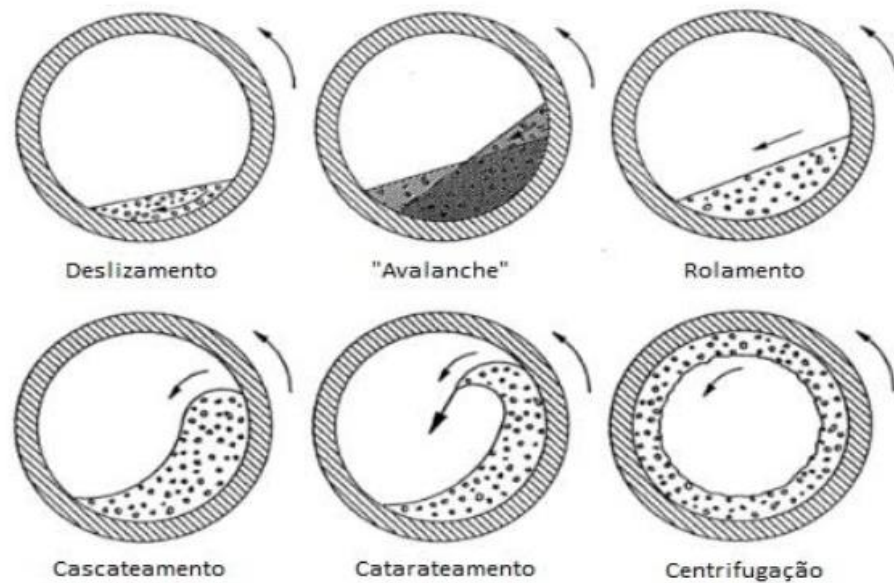
De maneira geral, segundo Fogagnolo (2000), durante a moagem, a energia que é empregue à cada partícula depende do número de choques que ocorre entre as partículas e delas com a carga moedora, além do número de corpos moedores e do vínculo carga/bolas.

2.2.4 Dinâmica da carga

Segundo Hema (2003), durante o movimento rotatório do cilindro, conforme a velocidade de rotação aumenta, o conjunto de sólidos, denominado leito de sólidos, assume diferente comportamento, conforme ilustrado na Figura 2.5.

Conhecer a dinâmica do leito de partículas e corpos moedores durante a moagem é de extrema importância, devido a sua aplicabilidade nas indústrias química, metalúrgica, alimentícia e outras, pois os tambores rotatórios podem ser empregados como misturadores, secadores, fornos, moinhos, entre outros (ROSEMAN; DONALD, 1962 e BAKER, 1983 e LIBOA, 2005 e HENEIN et al., 1983 e BOATENG, 1993 *apud* MACHADO, 2016; CLEARY, 2001; POWELL, 2004). O não conhecimento do movimento das partículas e da carga moedora, pode ocasionar falhas no processamento do material e até mesmo parada do processo produtivo (NASATO, 2011).

Figura 2.5 – Dinâmica das partículas dentro do moinho.



Fonte: Machado (2016) adaptado de Boateng (1993).

Além disso, conforme a aplicação industrial a ser utilizada, prefere-se certos regimes em relação aos demais devido às suas propriedades. Como por exemplo, para a aplicação dos tambores como fornos, reatores e resfriadores, prefere-se os escoamentos avalanche, rolamento e cascadeamento. Já para utilização como moinho, prefere-se o escoamento catarateamento (LIMA, 2017).

Ademais, segundo Lima (2018), compreender o comportamento dos corpos moedores no interior do moinho oferece um potencial para melhorias da operação resultando em diminuição de gastos energéticos, redução dos desgastes da carga moedora e do revestimento do moinho, entre outros benefícios.

Os regimes de escoamento dependem da velocidade de rotação, dimensões, volume preenchido e superfície interna do moinho, além das características e propriedades das partículas constituintes do material (HENIEN et al., 1983 *apud* LIMA, 2017).

2.2.4.1 Regime de deslizamento

Esse regime não possui aplicação industrial pois nela ocorre pouca mistura do material. Nele ocorre o deslizamento do leito de partículas sobre a parede do moinho em movimento. Baixos valores de velocidades e coeficientes de atrito entre a parede do cilindro e as partículas, colaboram na aparição desse regime (SHIERITT et al., 2003).

2.2.4.2 Regime de avalanche

Nesse regime, o leito de material se comporta como um corpo rígido que é carregado pela parede do cilindro, de modo que a inclinação da superfície do leito aumenta continuamente até alcançar um valor máximo de ângulo de repouso para, depois, cair como uma “avalanche”, atingindo um ângulo de repouso inferior. Conforme a velocidade de rotação do moinho é aumentada, o processo de levantamento e decaimento das partículas eleva sua frequência, e, conseqüentemente, inicia-se o regime de rolamento (HEMA, 2003).

2.2.4.3 Regime de rolamento

Nesse regime têm-se duas regiões: a camada passiva e a ativa. A passiva encontra-se próxima da superfície interna do moinho, a locomoção do material nessa camada é devido a velocidade de rotação do moinho. Já a camada ativa, próxima à superfície do leito, é onde as partículas apresentam maiores velocidades e rolam umas sobre as outras (AISSA; DUCHESNE; RODRIGUE, 2012). Esse regime possui alto nível de mistura da matéria e é amplamente utilizado nos processos industriais por favorecer a transferência de massa e calor (SANTOS, 2015).

2.2.4.4 Regime de cascadeamento

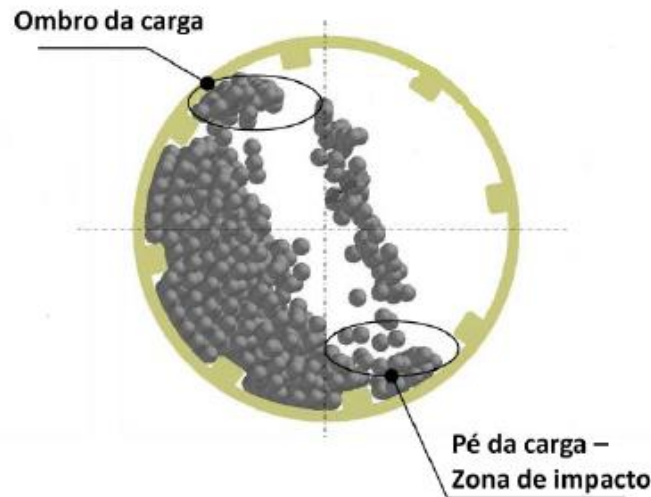
O cascadeamento ocorre quando a carga rola umas sobre as outras após serem carregadas pelo tambor até uma determinada altura (NUNES, 2012). Nesse regime, quase não ocorre choque entre corpo moedor e partículas. Ele é caracterizado pelos valores de velocidade do moinho inferiores a 50% da velocidade crítica, sendo o mecanismo predominante, abrasão (RODRIGUEZ, 2016). Conforme se eleva a velocidade de rotação, têm-se a passagem do regime de cascadeamento para o catarateamento.

2.2.4.5 Regime de catarateamento

Esse regime, considerado situação ideal para o funcionamento do moinho de bolas, ocorre quando a carga moedora alcança determinada altura e é lançada, em trajetórias parabólicas, sobre o leito de material, favorecendo a quebra das partículas por impacto (NUNES, 2012; MACHADO, 2016; CHAVES; PERES, 2012). Velocidade de rotação entre 50

a 90% da velocidade crítica representa esse regime (RODRIGUEZ, 2016). A Figura 2.6 ilustra o movimento de catarateamento total.

Figura 2.6 – Representação do fenômeno de catarateamento.



Fonte: Adaptado de Rodriguez (2016).

Ele é importante quando há partículas grosseiras no leito de material, responsáveis por diminuir o efeito de abrasão e afastar as bolas uma das outras. Devido a isso, é preciso quebrá-las pelo lançamento das bolas sobre o leito de bolas (CHAVES; PERES, 2012).

Além disso, o regime de catarateamento possui uma característica importante, a posição dos pontos de *shoulder* e *toe*, ou, ombro e pé, da carga, demonstrados na Figura 2.6, que fornecem a direção da carga (MACHADO, 2016). O ponto de *shoulder* é a altura mais alta que o corpo moedor consegue alcançar antes de sua queda, já o ponto *toe*, é a localização mais baixa em que ocorre o contato da carga com a superfície do moinho (POWELL, 2004).

2.2.4.6 Regime de centrifugação

Nesse regime, a força centrífuga e a força gravitacional que agem sobre as partículas entram em equilíbrio e não ocorre deslocamento entre a carga moedora e as partículas do material. Conseqüentemente, têm-se uma menor fratura das partículas, devido a isso, ele é considerado indesejável (WATANABE, 1999 *apud* MACHADO, 2016; JUAREZ; CHEN; LUEPTOW, 2011). Além disso, ele é caracterizado por velocidades do moinho acima de 90% da velocidade crítica (RODRIGUEZ, 2016).

2.2.5 Condições de Operação de Moinho de Bolas

A finura em que as partículas serão fraturadas no moinho de bolas é dependente do tempo em que o material permanecerá em processo de moagem e da quantidade de alimentação no moinho. A velocidade de rotação na qual as bolas começam a centrifugar nas paredes do moinho é chamada velocidade crítica. Esta pode ser determinada fazendo-se um balanço entre força da gravidade e força centrífuga sobre uma bola na parede do moinho, obtendo-se a expressão a seguir (ALVES, 2006):

$$V_c = \frac{42,2}{\sqrt{D-d}} \quad (2.1)$$

Em que: V_c é a velocidade crítica em rpm, D é o diâmetro interno do moinho e d é o diâmetro máximo das bolas, ambos em metros.

Para moinhos com corpos moedores de baixa densidade a velocidade ótima de rotação é 75% da velocidade crítica, já para corpos moedores de alta densidade recomenda-se 60% da velocidade crítica (RIBEIRO; ABRANTES, 2001).

2.3 Peneiramento e análise granulométrica

O peneiramento é um método de separação que considera a diferença entre os tamanhos das partículas. As peneiras são agrupadas em ordem decrescente de *mesh* ou em ordem crescente de diâmetro de peneira. O sólido alimentado é movimentado sobre a peneira e as partículas que constituem os finos passam pelas aberturas e as que ficam retidas são os grossos, conforme demonstrado na Figura 2.7 (CREMASCO, 2014).

A distribuição granulométrica do produto de moagem é utilizada como parâmetro característico da moagem e de sua classificação. Esse parâmetro é utilizado para o controle operacional devido sua facilidade e rapidez para ser medido (CHAVES; PERES, 2012).

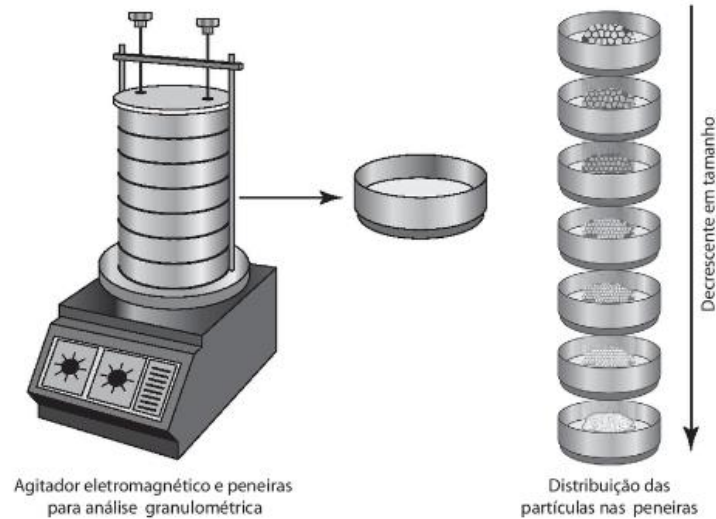
O conhecimento da distribuição da frequência de tamanhos de uma determinada amostra permite a definição do diâmetro médio de partícula, sendo o diâmetro médio de Sauter (Equação 2.2) o mais utilizado em sistemas particulados (CREMASCO, 2014).

$$d_{ps} = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{D_i} \right)} \quad (2.2)$$

Em que: x_i é a fração de massa retida na peneira e D_i é a média do valor do diâmetro de

abertura das peneiras do intervalo.

Figura 2.7 – Peneiramento realizado em escala laboratorial.



Fonte: Adaptada de Cremasco (2014).

2.4 Porosidade e massa específica de um material

Para se calcular a massa específica de um material, utiliza-se o método de Arquimedes, que consiste em verificar o volume de uma partícula. Para isso, imerge a amostra de partícula em um recipiente preenchido por um líquido e o volume deslocado representa o volume ocupado pela amostra no recipiente (CREMASCO, 2014), conforme equação 2.3.

$$\rho_p = \frac{m_{amostra}}{V_{amostra}} = \frac{m_{amostra}}{V_o - V_f} \quad (2.3)$$

O método de Arquimedes é mais apropriado para materiais não porosos. Porém, pode-se utilizar para os materiais porosos calculando a massa específica de duas maneiras, incluindo os poros e os excluindo. Para o caso de incluir os poros, têm-se a massa específica bulk, representada pela equação (CREMASCO, 2014):

$$\rho_{pA} = \frac{m_p}{V_{total}} \quad (2.4)$$

Já para o caso de não incluir os poros, têm-se a massa específica aparente, definida por:

$$\rho_{pR} = \frac{m_p}{V_{excluindo\ o\ volume\ dos\ poros}} \quad (2.5)$$

A partir da relação entre as massas específicas bulk e aparente, pode-se obter o valor da porosidade do material por meio da equação (CREMASCO, 2014):

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_{pA}}{\rho_{pR}} \quad (2.6)$$

2.5 Abordagem numérica

A simulação computacional é uma técnica no qual se reproduz fenômenos reais. Utilizando-a é possível avaliar o efeito de diversas variáveis do processo (LAW; KELTON, 1991 *apud* MACHADO, 2016). Além disso, a simulação é um complemento dos estudos experimentais, a partir dela, têm-se a redução do tempo de pesquisa e consegue-se superar as limitações experimentais impostas (SILVA, 2003; SANTOS, 2015).

Segundo Machado (2016), para a simulação da moagem, é importante ter conhecimento da dinâmica das partículas no interior do moinho. Numericamente, o sistema pode ser representado considerando-se apenas a fase sólida, por meio da modelagem monofásica. Ou, considerando a presença das fases sólidas e fluidas, pela modelagem multifásica.

Para se estudar o movimento dos corpos moedores no interior dos moinhos, utiliza-se simulações monofásicas aplicando-se a abordagem Lagrangeana, que considera a fase sólida como partículas discretas (RAJAMANI e VENUGOPAL, 2001; CLEARY; MORRISON; MORREL, 2003).

2.5.1 Abordagem Lagrangeana

Essa abordagem, fornece informações acerca do consumo de energia da operação, desgaste do revestimento e dos corpos moedores, informações dinâmicas, tais como trajetórias e as forças agindo sobre as partículas. Além disso, com base na trajetória de cada partícula, faz-se o estudo individual do comportamento de cada uma delas no interior do moinho. Este tipo de modelagem considera o efeito de forças externas e de interação entre as partículas (MACHADO, 2016; NASATO, 2011).

O Método dos Elementos Discretos (DEM) permite tratar problemas complexos nos diversos campos da engenharia, como representação de materiais sólidos ou estudos de problemas de escoamento. Consiste na discretização de um conjunto de pequenas partículas rígidas que interagem. Assim, 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 (TEIXEIRA, 2014).

Esse método aplica a segunda Lei de Newton para calcular a velocidade, momento e posição de cada partícula em cada instante de tempo. Além de fazer o uso do modelo de Hertz-Mindlin, que consistem em uma lei de deslocamento, para determinar a intensidade do contato e dos esforços entre as partículas e da partícula com a parede do equipamento (RAMOS; CARVALHO; TAVARES, 2011; SANTOS, 2015). Para processos que envolvam materiais particulados, ele é considerado eficaz em análises quantitativas e qualitativas desses sistemas (DOS SANTOS, 2018).

No estudo realizado por Carvalho e Tavares (2011) as simulações por DEM avaliando o efeito dos corpos moedores na taxa de quebra das partículas mostrou que, quanto maior a frequência, maior a taxa de quebra, porém os valores tendem a um valor máximo. Além disso, dependendo do tamanho do material moedor, têm-se a taxa de quebra máxima das partículas, como por exemplo, para as bolas de 25 mm, a taxa máxima ocorre para partículas com tamanho de 0,6 mm.

De acordo com Rajamani e Venugopal (2001), utilizando-se essa abordagem obtêm-se coerência entre os resultados simulados e experimentais. Essas simulações podem ser úteis para detectar problemas e prever o tempo de vida útil dos moinhos e corpos moedores. Além disso, pode-se identificar as localidades onde ocorrem maior cisalhamento das partículas em função da velocidade de rotação e do nível de enchimento do moinho (CLEARY, 2001).

2.5.2 Modelo de Hertz – Mindlin

Para a utilização do DEM é necessário um conjunto de equações para determinar os contatos entre as partículas. As equações são obtidas por meio de modelos de contato, responsáveis por fornecer a relação entre força, deformação e energia dissipada na fragmentação das partículas (DOS SANTOS, 2018).

Um dos modelos mais utilizados em DEM, considerado como modelo padrão de vários simuladores, é o de Hertz-Mindlin. Esse modelo contabiliza as forças de interação entre duas partículas. As iterações são caracterizadas pelos coeficientes de restituição, fricção estático e fricção de rolamento (ARAÚJO et al., 2015).

Devido a simplicidade do modelo, é possível contabilizar o movimento e a cinética das partículas. Por isso, é muito importante a definição correta dos seus parâmetros para que este apresente a realidade do processo na modelagem (DOS SANTOS, 2018).

2.5.3 Calibração de parâmetros de contato

Para simular o processo de moagem é necessário fazer a calibração do modelo, que consiste na estimativa de parâmetros com base nos resultados experimentais. Segundo Foggiatto (2019), a calibração deve ser realizada de modo que minimize a diferença entre os resultados experimentais e os simulados, para garantir coerência e qualidade na simulação.

Como mencionado anteriormente, é necessário conhecer três parâmetros para se saber as interações entre as partículas e com a superfície do moinho, sendo eles: coeficiente de restituição, coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito de rolamento. Segundo Rodriguez (2016), o coeficiente de restituição é a razão da velocidade antes e após o impacto em uma colisão e está relacionado à energia dissipada, indica se a colisão é elástica ou inelástica. O coeficiente de atrito estático determina a força necessária para movimentar um objeto. Já o coeficiente de atrito de rolamento, é a relação entre a força para manter o objeto em uma determinada velocidade constante e o produto do peso do sólido e o raio de curvatura.

Porém, encontra-se uma dificuldade muito grande para medir esses parâmetros e é devido a isso que surge uma metodologia cuja medição dos parâmetros é realizada de forma indireta. O objetivo é obter o ângulo de *toe* e *shoulder* mais próximos dos experimentais, para assim obter os valores dos parâmetros e utilizá-los nas simulações. Assim, é viável comparar a qualidade da simulação com os resultados experimentais.

2.5.4 Time-step

No método DEM, aplica-se as equações para determinar o número de colisões e força de colisões entre as partículas, de maneira individual, a cada passo de tempo, denominado time-step. Nas simulações, a escolha de um passo de tempo adequado é de grande importância, pois pode interferir nos resultados gerados.

Em um grupo de partículas, a transmissão de força entre elas ocorre através de onda de Rayleigh, que é definida como sendo a onda mecânica que percorre a superfície dos corpos elásticos. O tempo de integração que deve ser utilizado nas simulações deve ser inferior ao necessário para que a onda de Rayleigh percorra a partícula de menor tamanho (NASCIMENTO, 2018; DANBY; SHRIMPSON; PALMER, 2013).

Deste modo, segundo Lima (2017), a literatura recomenda a utilização de no máximo 20% do passo de tempo crítico, que é determinado pelo número de Rayleigh, obtido pela seguinte equação.

$$\Delta t_c = \frac{\pi r^2 \sqrt{\frac{\rho_s}{G}}}{0,1613 \nu_p + 0,8766} \quad (2.7)$$

Em que: r é o raio da menor partícula no sistema, ρ_s é a densidade da partícula, G o módulo de cisalhamento e ν_p a razão de Poisson.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção será apresentada todos os materiais, equipamentos e a metodologia utilizada durante a realização dos experimentos. Além da caracterização dos corpos moedores e do clínquer utilizados. E por fim, a metodologia empregada para a realização das simulações.

3.1 Módulo experimental

A parte experimental desse trabalho foi realizada em um módulo didático, modificado para possibilitar a moagem de clínquer, presente no Laboratório de Processos de Separação Mecânica no Departamento de Engenharia-ABI da Universidade Federal de Lavras, cuja estrutura é apresentada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Módulo experimental utilizado nos testes.



Fonte: Da autora (2019).

O moinho cilíndrico utilizado, operado horizontalmente, é composto por um tambor de 27 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento fabricado em aço. O módulo didático conta com um motor elétrico que possibilita a frequência de rotação do motor de 1 até 60 Hz. O controle da velocidade é feito através de um painel de controle.

O interior do moinho possui dimensões equivalentes a 24,5 cm de diâmetro e 47 cm de comprimento e contém quatro pás retangulares (Figura 3.2) de 45 cm de comprimento, 3,8 cm de largura e 0,4 cm de espessura com objetivo de auxiliar o carregamento do material e dos corpos moedores.

A parte da frente do moinho é fechada com um vidro que permite a visualização do

processo de moagem ao decorrer dos experimentos. A peça é móvel, logo, retira-se ela para fazer-se o carregamento ou descarregamento da carga moedora e do material.

Figura 3.2 – Interior do tambor cilíndrico.



Fonte: Da autora (2019).

3.2 Carga moedora

Os corpos moedores utilizados foram esferas de aço, conforme apresentadas na Figura 3.3, de 25 mm de diâmetro, densidade e porosidade conhecidas correspondendo o valor de 7890kg/m^3 e 0,368 cedidos pela Universidade Federal de Uberlândia.

Figura 3.3 – Amostra das bolas de aço utilizadas no experimento.



Fonte: Da autora (2019).

A Tabela 3.1 apresenta os valores do módulo de Young, da razão de Poisson e da força de cisalhamento para as esferas moedoras de aço, segundo Lima (2017), posteriormente

utilizadas nas simulações.

Tabela 3.1 – Valores utilizados para as esferas moedoras.

Razão de Poisson [-]	Módulo de Young [Pa]	Força de Cisalhamento [Pa]
0,2	5×10^6	$3,57 \times 10^6$

Fonte: Lima (2017).

3.3 Material de estudo

O material utilizado no presente trabalho, clínquer (Figura 3.4), foi cedido pela InterCement, fábrica de cimento Portland, localizada na cidade de Ijaci.

Figura 3.4 – Amostra de clínquer cedida pela InterCement.



Fonte: Da autora (2019).

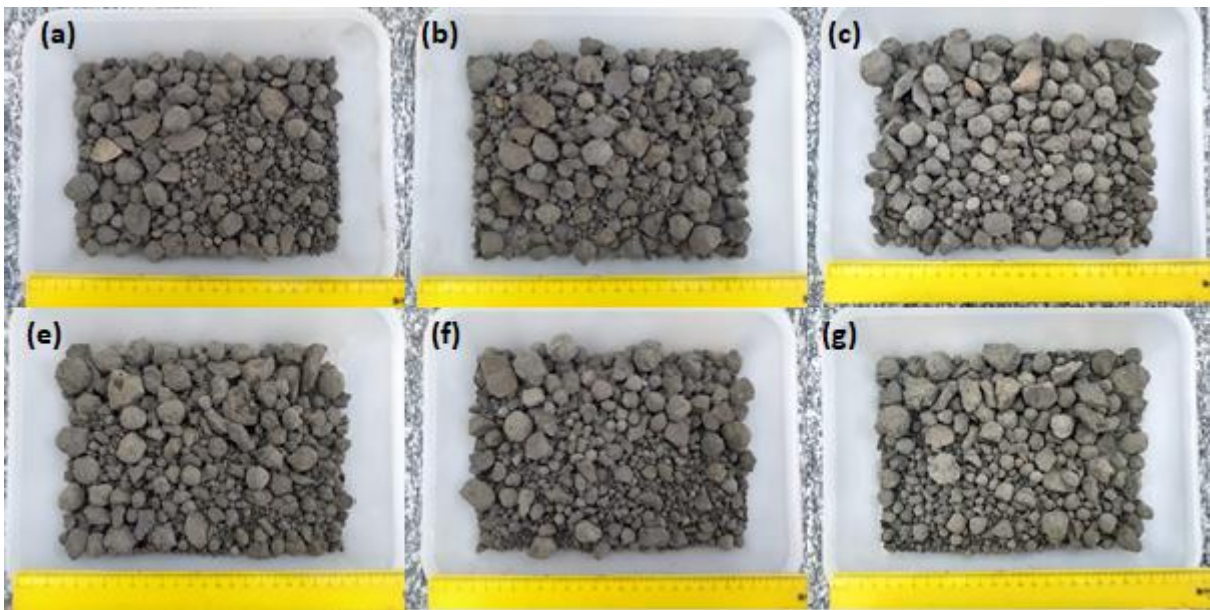
Para a determinação da densidade do material, com auxílio de uma balança pesou-se 91,17 gramas de clínquer em um béquer. Após isso, colocou o conteúdo em uma proveta de volume conhecido e adicionou 200mL de água e verificou a diferença entre os volumes inicial e final. Já para determinação da porosidade do leito, foi adicionado uma quantidade de clínquer de maneira que correspondesse a 180mL de uma proveta, em seguida adicionou-se água de forma a cobrir todo o material. O valor da água adicionada foi monitorado utilizando uma outra proveta de 150mL e anotou-se a quantidade utilizada para cobrir o material.

Para fins de comparação e posterior análise da eficiência das moagens realizadas, o diâmetro médio inicial das partículas foi determinado. Para isso, depois de realizada a homogeneização de todo o material disponível, foram selecionadas seis amostras de clínquer.

Devida a indisponibilidade de peneiras com malha grossa o suficiente para fazer a classificação granulométrica do material através do peneiramento, fez-se o uso do ImageJ,

software de processamento de imagens de código aberto. Para isso, foram capturadas imagens das amostras de clínquer (Figura 3.5), que foram levadas ao *software* para a obtenção dos diâmetros das partículas. Nas imagens capturadas, foi necessária a utilização de uma régua para calibração do programa, que faz a relação entre centímetros e pixels. Após a calibração, os diâmetros de todas as partículas visíveis nas imagens foram medidos e, posteriormente, foi construído um gráfico para determinação da faixa de diâmetros das partículas.

Figura 3.5 – Amostras do material de clínquer antes do processo de moagem.



Fonte: Da autora (2019).

3.4 Planejamento estatístico de experimentos

No trabalho em questão, estudou-se a interferência de duas variáveis no processo: a velocidade de rotação do tambor e a quantidade de material a ser moído. Para a velocidade de rotação, utilizou-se 15, 31 e 47 rpm, equivalentes a 20, 40 e 60 Hz da frequência do motor. Já para a fração de enchimento de material, utilizou-se 3, 5 e 7% do volume do tambor. Com o objetivo de se analisar o efeito de cada uma dessas variáveis, utilizou-se o planejamento estatístico de experimento conhecido como planejamento fatorial 3^k .

Segundo Rocha et. al (2015, p. 82), “o planejamento fatorial é uma abordagem estatística que envolve a construção de uma combinação de fatores, escolhidos dentre os parâmetros que se deseja estudar, para a investigação da significância desses fatores sobre o estudo”. Assim, obteve-se 27 combinações, ilustradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Combinações estatística obtidas pelo planejamento fatorial.

Experimento	Fração de material (%)	Velocidade (rpm)	Tempo de moagem (min)
1	2,5	15	5
2	2,5	15	10
3	2,5	15	15
4	2,5	31	5
5	2,5	31	10
6	2,5	31	15
7	2,5	47	5
8	2,5	47	10
9	2,5	47	15
10	5	15	5
11	5	15	10
12	5	15	15
13	5	31	5
14	5	31	10
15	5	31	15
16	5	47	5
17	5	47	10
18	5	47	15
19	7,5	15	5
20	7,5	15	10
21	7,5	15	15
22	7,5	31	5
23	7,5	31	10
24	7,5	31	15
25	7,5	47	5
26	7,5	47	10
27	7,5	47	15

Fonte: Da autora (2019).

3.5 Moagem de clínquer

Para determinar a fração de bolas e clínquer a ser adicionada ao moinho, escolheu-se o valor de 4% da capacidade do tambor ocupado pelas bolas, sendo este valor constante, e fração de material de 2,5, 5 e 7,5% da capacidade do tambor ocupado pelo material, como descritos no item anterior. Os valores de porcentagem escolhidos devem-se a limitação do módulo didático devido a potência do motor não conseguir trabalhar com grande peso, impedindo que fosse possível trabalhar com o leito dentro da faixa indicada pela literatura, de 35 a 40% do volume útil de corpos moedores.

Com essas porcentagens foram calculados os volumes de clínquer e bolas a ser adicionado e, utilizando a densidade desses componentes, determinadas anteriormente, calculou-se as massas utilizadas em cada experimento.

Inicialmente pesou-se a massa de material e de esferas para o devido experimento e colocou-se ambos no tambor cilíndrico. Fechou-se o moinho com a tampa de vidro, que foi travada, de modo a evitar seu deslocamento durante o processo, colocando, em seguida, o tambor sobre os roletes. Após isso, regulou-se a frequência da agitação para o valor requerido, ajustou-se o timer para 5 minutos e acionou-se a chave para que o moinho entrasse em funcionamento. Passado esse tempo, retirou-se 100 gramas do material moído e realizou-se a análise granulométrica deste. Todo o procedimento descrito neste item foi repetido mais duas vezes, totalizando o tempo de moagem de 15 minutos e repetido para os outros oito experimentos.

3.6 Análise granulométrica do clínquer após a moagem

Os testes foram realizados por um intervalo de tempo previamente estabelecido de 15 minutos e fez-se pausa, a cada 5 minutos, para a realização de análises intermediárias do material moído até aquele instante e, obteve-se assim a granulometria do material ao decorrer do experimento. Para o peneiramento do material particulado durante a moagem, selecionaram-se as peneiras de abertura 10, 16, 20, 30, 42 *mesh* e um prato de fundo. Pesou-se cada uma dessas peneiras e anotou-se suas respectivas massas. Após isto, encaixou-se todas elas sobre o agitador mecânico.

Retirou-se do tambor uma amostra de clínquer moído, pesou-se 100 gramas, utilizando-se a balança analítica, e transferiu-se a massa para a peneira superior, que foi tampada e iniciou-se o peneiramento. Decorridos 10 minutos de agitação, desmontou-se o conjunto e pesou-se as massas das peneiras contendo material retido, anotando-se esses valores. Em seguida, retornou o material para o tambor e prosseguiu-se com a moagem. O procedimento foi repetido para todos os experimentos.

3.7 Metodologia numérica

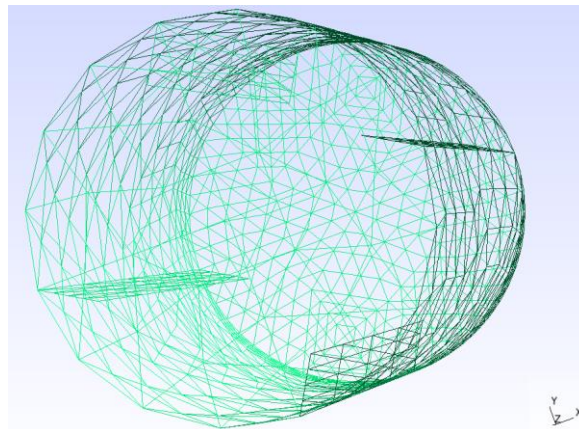
3.7.1 Elaboração da malha e programa para simulação

Para analisar o comportamento dos corpos moedores no interior do moinho, com base

na geometria do cilindro, montou-se a malha computacional do equipamento, conforme ilustrado na Figura 3.6, utilizando-se o *software* GMSH.

Segundo Machado (2016), essa etapa é muito importante, pois a qualidade da malha interfere nos resultados simulados e podem levar a conclusões incoerentes com a realidade do experimento. Para a construção da malha computacional, considerou a área interna do tambor, sendo seu comprimento de 47 cm e diâmetro de 24,5 cm. Os quatro suspensores também foram levados em consideração e foram inseridos com altura de 45 cm, espessura de 0,4 cm e largura de 3,8 cm.

Figura 3.6 - Malha computacional do tambor cilíndrico.



Fonte: Da autora (2019).

O programa para realização das simulações foi implementado no *software* LIGGGHTS, utilizando o modelo de contato de Hertz-Mindlin, e os resultados foram verificados visualmente no *software* PARAVIEW. Todas as simulações foram realizadas para um *time-step* de 20% do passo de tempo de Rayleigh.

3.7.2 Calibração

Para a obtenção dos coeficientes que caracterizasse as iterações entre os corpos moedores dos testes experimentais, utilizou-se uma metodologia indireta. Para isso, gravou-se um vídeo do movimento da carga moedora no interior do moinho operando a velocidade de 15 rpm e obteve-se, posteriormente, imagens. Utilizando o *software* Measure, foi possível obter os ângulos de *toe* e *shoulder* da carga para o teste experimental. Consequente, através de pesquisa bibliográfica, estimou-se os valores dos parâmetros para o aço, visto que o moinho e os corpos moedores eram fabricados desse material, os valores estão demonstrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores dos parâmetros encontrados na literatura.

Coefficientes	Mínimo	Máximo	Média
Atrito Estático	0,4	0,7	0,55
Atrito de Rolamento	0,01	0,05	0,03
Restituição	0,3	0,7	0,5

Fonte: Cleary; Morrison; Morrell, 2003; Cleary; Owen, 2019; Cleary; Owen, 2015.

A partir desses valores, utilizou-se o planejamento estatístico de experimento conhecido como planejamento composto central para obter combinações entre os diferentes valores dos coeficientes. Segundo Souza et al. (2015), esse planejamento possui o papel de combinar as variáveis e obter-se seus valores que irão produzir a melhor resposta desejada. Assim, obteve-se dezesseis combinações dos parâmetros, ilustrados na Tabela 3.4.

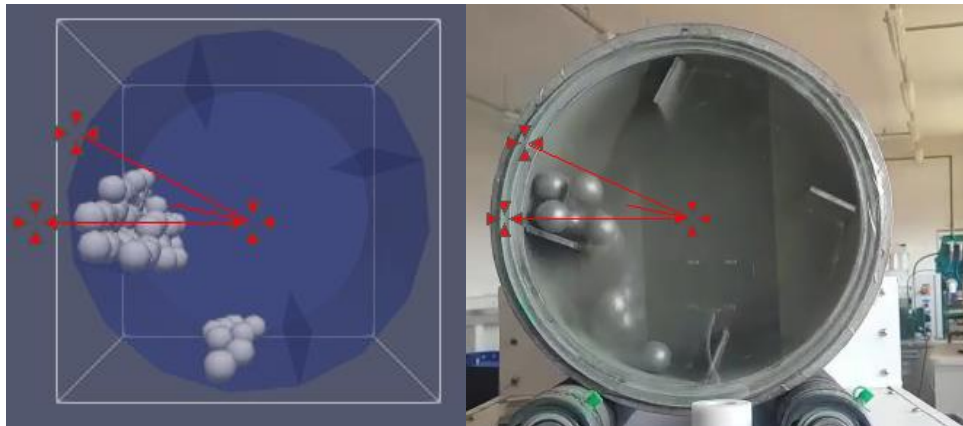
Tabela 3.4 – Combinações estatística obtidas pelo planejamento composto central.

nº	Atrito estático	Atrito de rolamento	Restituição
1	0,4	0,01	0,3
2	0,4	0,01	0,7
3	0,4	0,05	0,3
4	0,4	0,05	0,7
5	0,7	0,01	0,3
6	0,7	0,01	0,7
7	0,7	0,05	0,3
8	0,7	0,05	0,7
9	0,356921724	0,03	0,5
10	0,743078276	0,03	0,5
11	0,55	0,00425623	0,5
12	0,55	0,05574377	0,5
13	0,55	0,03	0,242562299
14	0,55	0,03	0,757437701
15	0,55	0,03	0,5

Fonte: Da autora (2019).

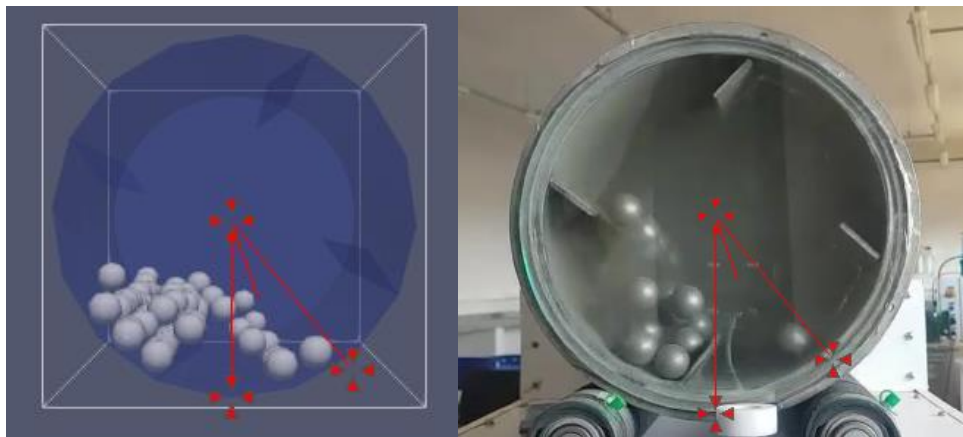
Posteriormente, realizou-se simulações para cada uma das combinações, utilizando seus respectivos valores de coeficientes, e velocidade de rotação do moinho de 15 rpm. A partir disso, obteve-se imagens e, utilizando-se o *software* Measure, mediu-se os seus ângulos de *toe* e *shoulder* que foram comparados com os ângulos encontrados para o teste experimental. As Figuras 3.7 e 3.8 ilustram a obtenção dos ângulos das imagens da moagem simulada e da experimental.

Figura 3.7 – Obtenção do ângulo *shoulder* para a simulação 7 e para o ensaio experimental.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 3.8 – Obtenção dos ângulos de *toe* para a simulação 7 e para o ensaio experimental.



Fonte: Da autora (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão serão apresentados os resultados experimentais e simulados da moagem de clínquer, assim como a influência das variáveis operacionais estudadas na dinâmica dos corpos moedores.

4.1 Caracterização do clínquer e velocidade crítica de moagem

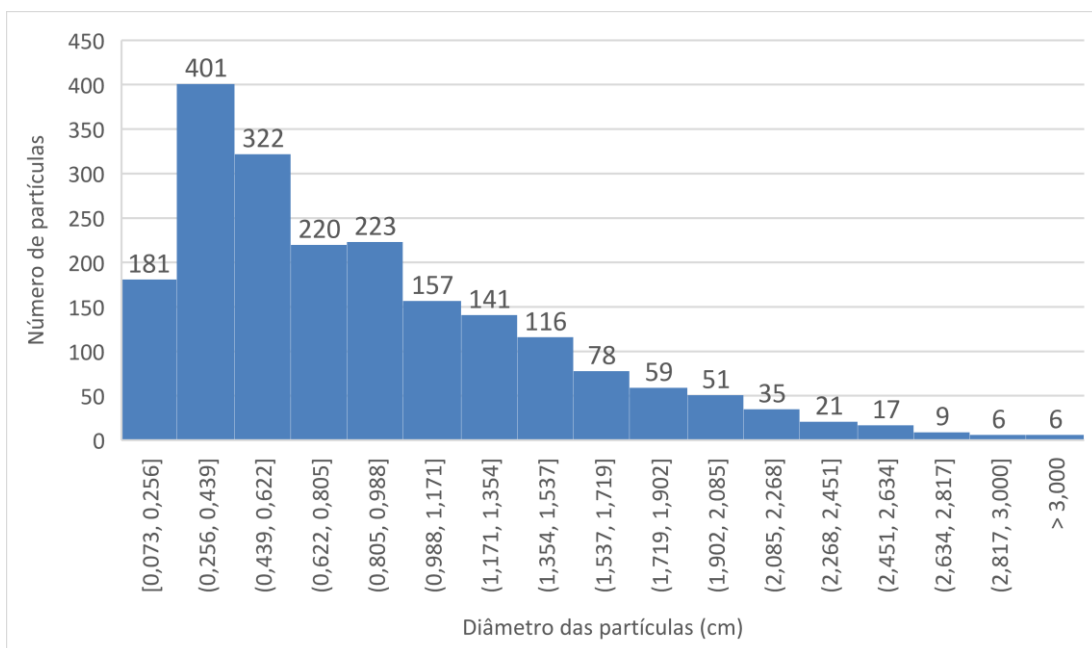
A partir da metodologia descrita, utilizando-se a equação 2.3, calculou-se a densidade do clínquer, corresponde ao valor de 3039 kg/m^3 . Além da densidade, calculou-se também a porosidade do leito, por meio da equação 2.6, obtendo como resultado o valor de 0,5567.

A partir do diâmetro interno do tambor e do diâmetro da carga moedora, utilizando a equação 2.1, calculou-se a velocidade crítica de moagem, correspondente à 89,97 rpm, mostrando que todas as velocidades utilizadas nesse trabalho estão abaixo da velocidade crítica.

4.2 Determinação do diâmetro inicial do material

A partir do *software* ImageJ, pode-se obter os diâmetros das partículas do material estudado. Utilizando os valores gerados, obteve-se o resultado ilustrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Diâmetros das partículas de clínquer.



Fonte: Da autora (2019).

A partir dessa figura, pode-se notar que maioria das partículas de clínquer encontram-se dentro da faixa de 0,439 a 3,000 μm , representando 71,5% da amostra do material analisada. Enquanto, 28,5% encontra-se na faixa de 0,073 a 0,439 μm . Esse resultado demonstra que no material havia partículas pequenas, porém, a maioria possuía tamanho considerável. Fazendo-se uma média ponderada, obtém-se como resultado o diâmetro médio das partículas de 0,87 μm , ou seja, 8,7 mm.

4.3 Diâmetro médio de Sauter

Com o intuito de avaliar a eficiência de moagem para o tambor operando em diferentes condições operacionais, foi determinado o diâmetro médio de Sauter das partículas, a partir da equação 2.2, nos tempos de 5, 10 e 15 minutos de moagem. A Tabela 4.1 apresenta o diâmetro médio de Sauter calculado para cada combinação das variáveis.

Tabela 4.1 – Diâmetro médio de Sauter para os tempos de 5, 10 e 15 minutos.

Fração de material (%)	Velocidade (rpm)	Diâmetro (mm)		
		5 minutos	10 minutos	15 minutos
2,5	15	0,43406	0,32112	0,26994
2,5	31	0,28030	0,21639	0,19610
2,5	47	0,26459	0,22252	0,19826
5	15	0,36922	0,28449	0,25337
5	31	0,28844	0,25523	0,23773
5	47	0,28713	0,24870	0,22450
7,5	15	0,73765	0,52548	0,42852
7,5	31	0,42436	0,29642	0,25516
7,5	47	0,39274	0,32065	0,27585

Fonte: Da autora (2019).

Analisando a Tabela 4.1, observa-se que o diâmetro médio de Sauter, para as velocidades de 31 e 47 rpm, é menor quando se utiliza uma fração de material que corresponde a 2,5% do volume do tambor, quando em comparação com as frações de enchimento mais altas. Isto se deve ao fato de que quanto menos material, maior é a probabilidade de contato entre as esferas moedoras e o clínquer, que são as colisões efetivas.

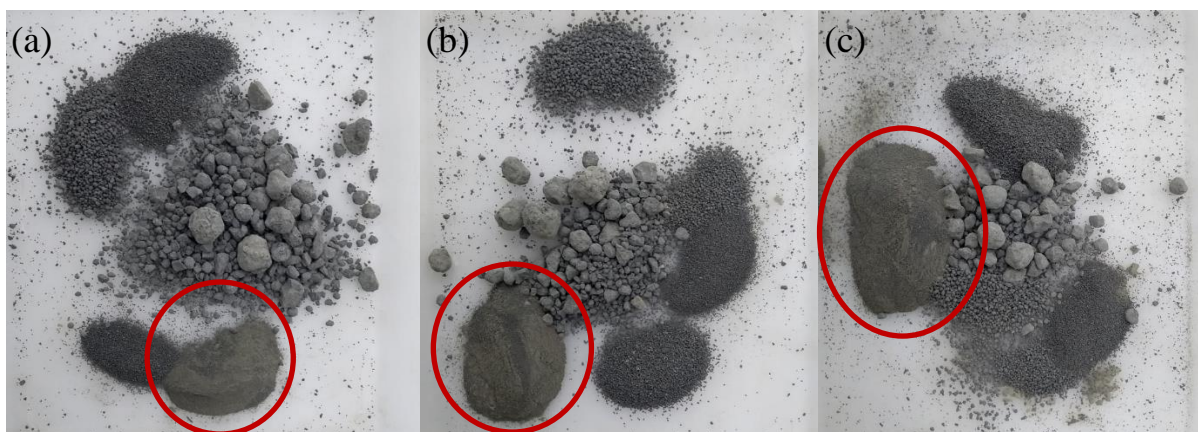
Para a velocidade de 15 rpm, a fração de enchimento de 2,5% apresentou menor diâmetro se comparado com o obtido para a fração de 7,5%. Porém ao se comparar com a fração de 5% de enchimento, esta apresentou menor valor de diâmetro, indicando uma melhor

efetivação da moagem. Esse resultado mostra a necessidade de se avaliar então a dinâmica dos corpos moedores, que foi então realizado através das simulações.

Em todas as frações de enchimento do tambor observa-se uma diminuição do diâmetro médio de Sauter ao longo do tempo. Isso é esperado, uma vez que a moagem promove a redução do tamanho das partículas. No entanto, ao avaliar o efeito da velocidade de rotação, após os 15 minutos de moagem, observa-se que o aumento da frequência de rotação de 31 para 47 rpm não promoveu uma melhora efetiva na moagem quanto o aumento de 15 para 31 rpm. Esperava-se que com o aumento da velocidade haveria um aumento da força de impacto entre os corpos moedores e as partículas, aumentando a eficiência de moagem e reduzindo o diâmetro médio de Sauter das partículas. No entanto, o aumento da velocidade pode levar a um menor contato das esferas moedoras com as partículas de clínquer devido a uma mudança no regime do leito de partículas. Quando há essa mudança de regime, as esferas são lançadas a maiores distâncias e o contato com as partículas é reduzido. Esse resultado também mostra a necessidade de se avaliar a dinâmica dos corpos moedores, que foi então realizado através das simulações.

As análises feitas utilizando a Tabela 4.1 podem ser realizadas também observando as imagens dos resultados obtidos após a moagem de clínquer, demonstradas nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4. A Figura 4.2 demonstra a amostra do material de clínquer moído e como a quantidade de partículas finas aumenta no decorrer do tempo de moagem. Representando assim, que o diâmetro médio das partículas sofre redução ao longo da operação de moagem.

Figura 4.2 – Imagens obtidas da moagem de clínquer após (a)5, (b)10 e (c)15 minutos de operação para o experimento com 7,5% de enchimento de material e velocidade de rotação equivalente a 47 rpm.

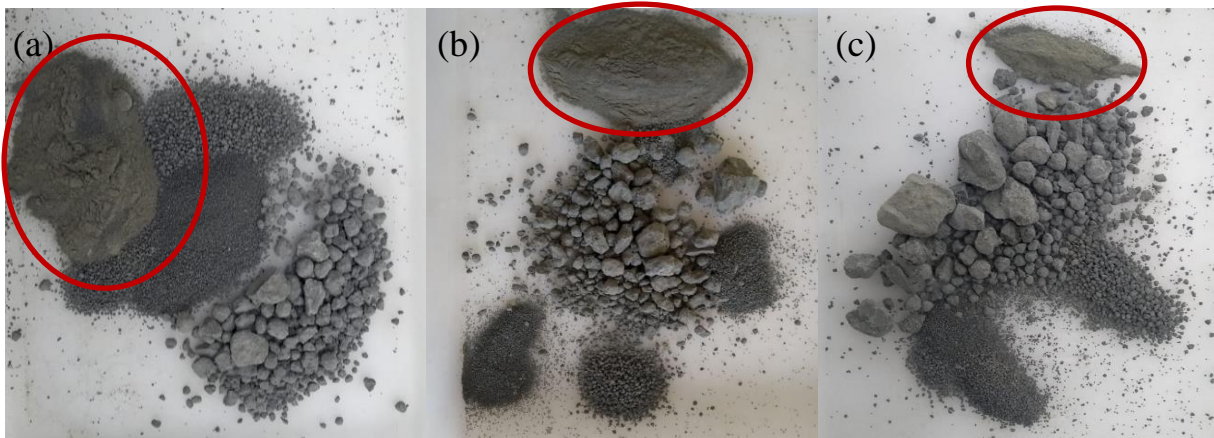


Fonte: Da autora (2019).

Através da Figura 4.3, pode-se notar a influência da fração de material na moagem de clínquer durante 15 minutos de operação com a velocidade de rotação de 15 rpm. Como

mencionado anteriormente, para a menor fração de enchimento, têm-se uma maior quantidade de partículas com tamanhos menores, demonstrando uma efetiva moagem das partículas. Já para as frações de enchimento maiores, nota-se menor quantidade de partículas com tamanho pequeno, demonstrando a menor efetivação da moagem.

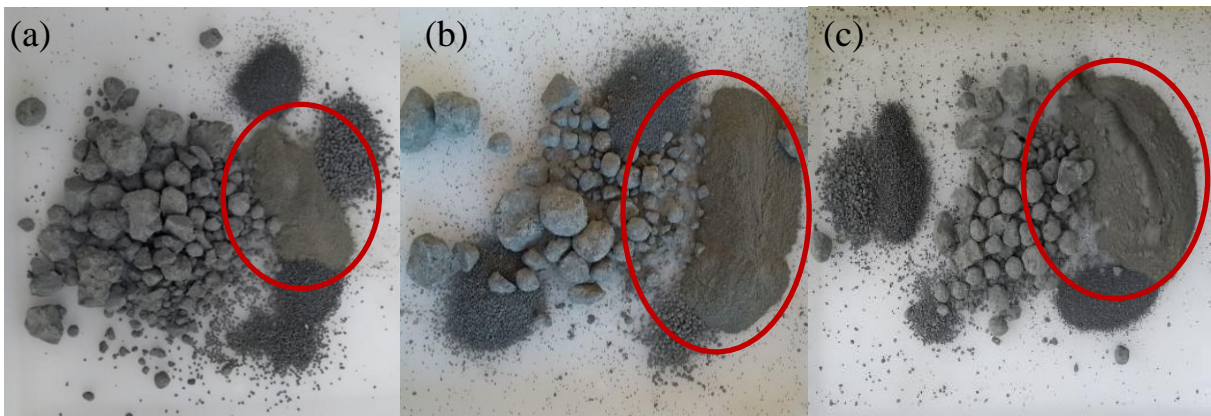
Figura 4.3 – Imagens obtidas da moagem de clínquer após 15 minutos de operação equivalentes a (a)2,5%, (b)5% e (c)7,5% de enchimento de material para a velocidade de rotação de 15 rpm.



Fonte: Da autora (2019).

Por fim, pode-se notar a influência da velocidade de rotação na moagem para a mesma fração de enchimento de material e tempo de operação observando-se a Figura 4.4. Para a menor velocidade, de 15 rpm, obtém-se menor quantidade de partículas finas. Já para as velocidades de 31 e 47 rpm, obtém-se maior parcela de partículas de tamanhos menores, sendo seus resultados muito próximos e por isso, o diâmetro médio das partículas foram próximos.

Figura 4.4 – Imagens obtidas da moagem de clínquer após 10 minutos de operação com 2,5% de enchimento de material nas velocidades de rotação de (a)15 rpm, (b)31 rpm e (c)47 rpm.



Fonte: Da autora (2019).

4.4 Peneiramento total das partículas

Para as análises anteriores, o peneiramento foi realizado apenas para 100 gramas do material moído no tempo de 5, 10 e 15 minutos de operação. No entanto, desconfiando-se de um possível efeito de amostragem nos resultados, realizou-se o peneiramento de todo o material contido no moinho ao final da moagem e obteve-se o diâmetro médio das partículas. A Tabela 4.2 mostra os valores encontrados.

Tabela 4.2 – Diâmetro médio de Sauter para o tempo de 15 minutos para a amostra de 100 gramas e para a amostra com o peso total de clínquer da moagem.

Fração de material (%)	Velocidade de rotação (rpm)	Diâmetro médio de Sauter (mm)	
		Amostra de 100g	Amostra com peso total
2,5	15	0,26994	0,27370
2,5	31	0,19609	0,20483
2,5	47	0,19826	0,20841
5	15	0,25336	0,25359
5	31	0,23772	0,24716
5	47	0,22450	0,22833
7,5	15	0,42852	0,43253
7,5	31	0,25515	0,26117
7,5	47	0,27584	0,27215

Fonte: Da autora (2019).

Pode-se notar pela Tabela 4.2 que os valores de diâmetros médio de Sauter obtidos para as amostras de 100 gramas e para o material com o peso total, em todos os experimentos, se aproximaram significativamente. A maior diferença percentual entre os valores encontrados em relação à amostra com o peso total foi de de 4,8% e compreende o experimento com 2,5% de enchimento de material e velocidade de 47 rpm.

Esses resultados demonstram que as amostras de 100 gramas permitiram uma caracterização fiel do material, ou seja, todos os diâmetros presentes na amostra foram englobados no peneiramento. Consequentemente, os diâmetros encontrados para os demais tempos, 5 e 10 minutos, de moagem, são valores representativos.

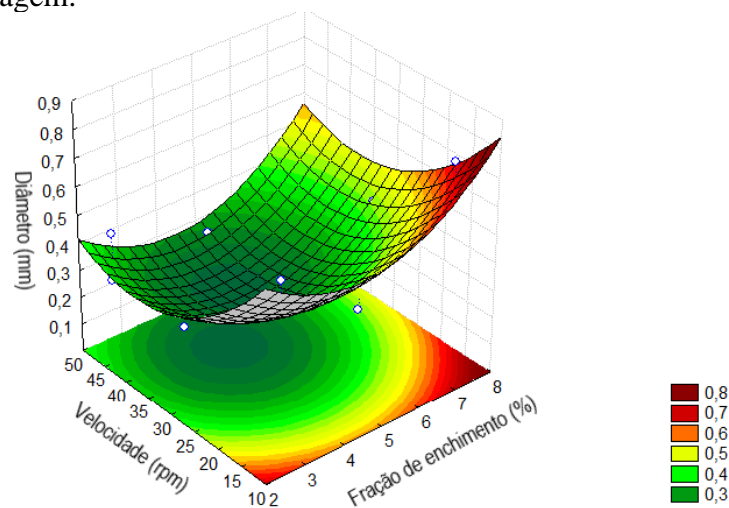
4.5 Análise estatística

Utilizando-se o *software* Statistica, analisou-se a relação das variáveis, velocidade de

rotação e fração de enchimento do material a ser moído, em cada tempo de moagem através da técnica de superfície de respostas. As superfícies de resposta permitem uma melhor visualização dos efeitos que as variáveis estudadas exercem no diâmetro médio de Sauter das partículas.

A seguir, têm-se as Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 que ilustram as superfícies de resposta, realizadas com grau de confiança de 95%, para os tempos de moagem de 5, 10 e 15 minutos. Seus coeficientes de determinação são, respectivamente, 0,78; 0,75 e 0,74. Dentre os tempos de moagem, o de 5 minutos apresentou o maior valor de R^2 , indicativo que o ajuste para o processo de moagem nesse tempo de operação apresenta resultados que se ajustam melhor ao modelo quadrático se comparado aos demais. Conseqüentemente, os diâmetros encontrados nessa situação apresentam os valores que mais correspondem à realidade das amostras.

Figura 4.5 – Superfície de resposta para o diâmetro médio de Sauter, após 5 minutos de moagem.



Fonte: Da autora (2019).

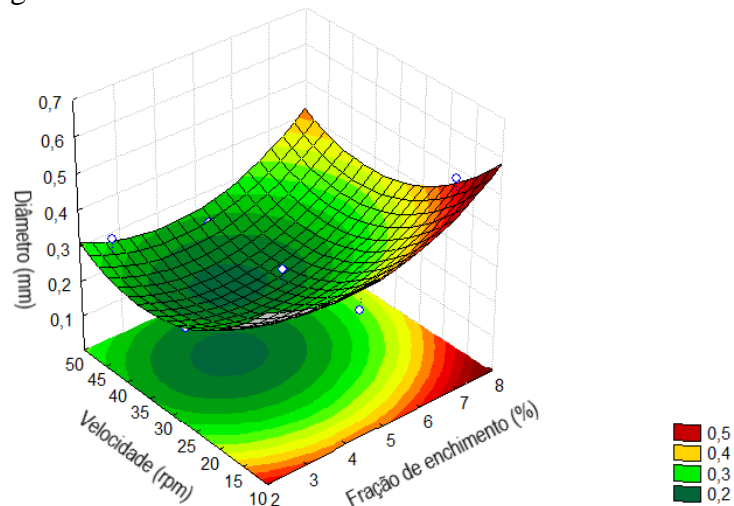
Analisando as Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 pode-se observar que os menores diâmetros possíveis são encontrados para velocidades de rotação de 35 a 40 rpm e frações de materiais de 4 a 5% de enchimento. Esses valores são responsáveis por permitirem uma maior força de impacto entre os corpos moedores e o clínquer. Porém, esses resultados foram diferentes dos resultados presentes na Tabela 4.1, em que os menores diâmetros das partículas foram obtidos com a velocidade de 31 rpm e fração de material a ser moído de 2,5%. Atribui-se essa diferença entre o ajuste e o experimental ao fato de que os valores de R^2 não se aproximarem de 1, o que indica que o ajuste pode não corresponder à realidade prática.

A partir da Figura 4.5 que mostra o efeito das variáveis operacionais após 5 minutos de moagem, pode-se notar que a faixa de diâmetro para esse tempo de operação apresenta valor de

0,3 a 0,8 mm. Sendo esta, a maior faixa se comparada aos demais tempos de moagem.

Analisando a Figura 4.6, que mostra o diâmetro médio de Sauter após 10 minutos de moagem, observa-se que a faixa de diâmetro das partículas apresentou uma diminuição se comparado ao de 5 minutos de moagem. O que já era esperado, visto que se têm um tempo maior para a quebra das partículas.

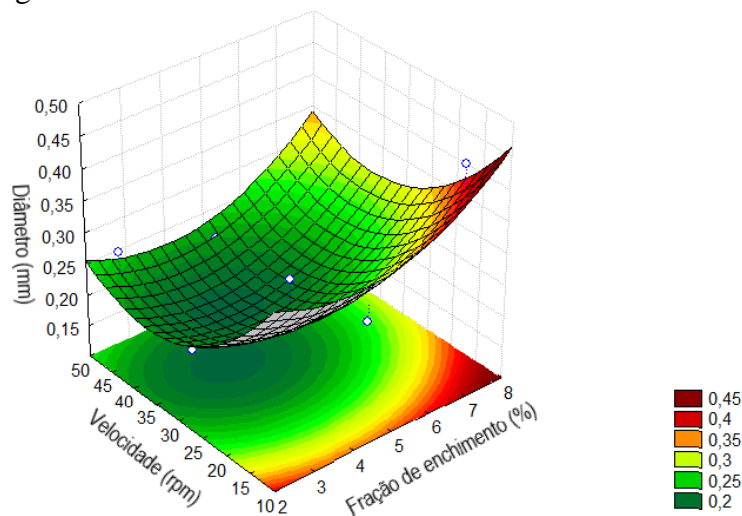
Figura 4.6 – Superfície de resposta para o diâmetro médio de Sauter, após 10 minutos de moagem.



Fonte: Da autora (2019).

Analisando a Figura 4.7, que apresenta os resultados para os 15 minutos de moagem, tem-se a menor faixa de diâmetros se comparado às demais figuras, indicando que nesse tempo ocorre a maior redução do tamanho das partículas.

Figura 4.7 – Superfície de resposta para o diâmetro médio de Sauter, após 15 minutos de moagem.



Fonte: Da autora (2019).

As superfícies de resposta mostram que quando a velocidade de rotação é maior que 20 rpm e a fração de enchimento de material é menor que 7%, elas atuam de forma positiva na diminuição do diâmetro. Ademais, pode-se notar que a faixa de diâmetro para o tempo de 15 minutos de moagem foi muito parecido com a de 10 minutos, havendo apenas uma redução da faixa de diâmetro das partículas de 0,5 mm para 0,45 mm. Os resultados encontrados estão de acordo com o esperado, visto que quanto maior tempo de moagem, há uma maior moagem e consequentemente, uma diminuição do diâmetro das partículas.

Logo, é possível otimizar o processo de moagem e pode-se verificar que uma fração intermediária, dentre a faixa trabalhada (3, 5 e 7%) de enchimento de material e uma frequência intermediária (15, 31 e 47 rpm) de velocidade de rotação levam a um resultado melhor, ou seja, menor diâmetro das partículas.

Outra resposta que se pode obter com o uso desse *software*, são os valores ótimos das variáveis para obtenção dos menores diâmetros das partículas para cada tempo de moagem, conforme mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores ideais para cada tempo de moagem.

Tempo de moagem (min)	Fração de material (%)	Velocidade (rpm)	Diâmetro de Sauter esperado (mm)
5	4,43576	37,77626	0,20970
10	4,22284	36,35037	0,19117
15	4,04491	36,65084	0,18479

Fonte: Da autora (2019).

Os valores ideais das variáveis para se obter um menor diâmetro da partícula para o tempo de 5 minutos seria possível se trabalhasse com a fração de enchimento de material a 4,44% e com a velocidade de, aproximadamente, 37,78 rpm, resultando em um diâmetro médio de Sauter de 0,21 mm.

Para a moagem de 10 minutos seria possível obter menor diâmetro se utilizasse a fração de enchimento de 4,22% e velocidade de, aproximadamente, 36,35 rpm, obtendo diâmetro médio de Sauter de 0,19 mm. Para esse tempo de moagem, quanto menor a fração de enchimento e maior a velocidade de rotação, têm-se uma moagem mais efetiva.

Já para a moagem de 15 minutos, um menor diâmetro da partícula seria possível se utilizasse 4,04% da fração de enchimento de material e velocidade de, aproximadamente, 36,65 rpm, obtendo-se diâmetro médio de Sauter de 0,18 mm.

De maneira geral, para toda a faixa de enchimento utilizada, trabalhando-se com um

valor de 4,04 a 4,44% e uma velocidade de rotação de 35,35 a 37,77 rpm, mais eficiente é a moagem, consequentemente, menor o diâmetro obtido.

4.6 Calibração

Após a comparação dos valores de ângulo *toe* e *shoulder*, das dezesseis simulações com o obtido experimentalmente, identificou-se que a simulação 7, correspondeu a melhor aproximação. Os valores de coeficientes utilizados nas simulações representando o estudo experimental estão demonstradas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Coeficientes utilizados.

Coeficientes	Valor
Restituição	0,3
Atrito estático	0,7
Atrito de rolamento	0,05

Fonte: Cleary; Morrison; Morrell, 2003; Cleary; Owen, 2019; Cleary; Owen, 2015.

A partir da obtenção desses valores, utilizou-os como parâmetros para as posteriores simulações representando o estudo experimental do presente trabalho. Além disso, pode-se observar que maiores valores de coeficiente de atrito estático e atrito de rolamento e menor valor de restituição apresentaram melhores resultados para simular o comportamento dos corpos moedores.

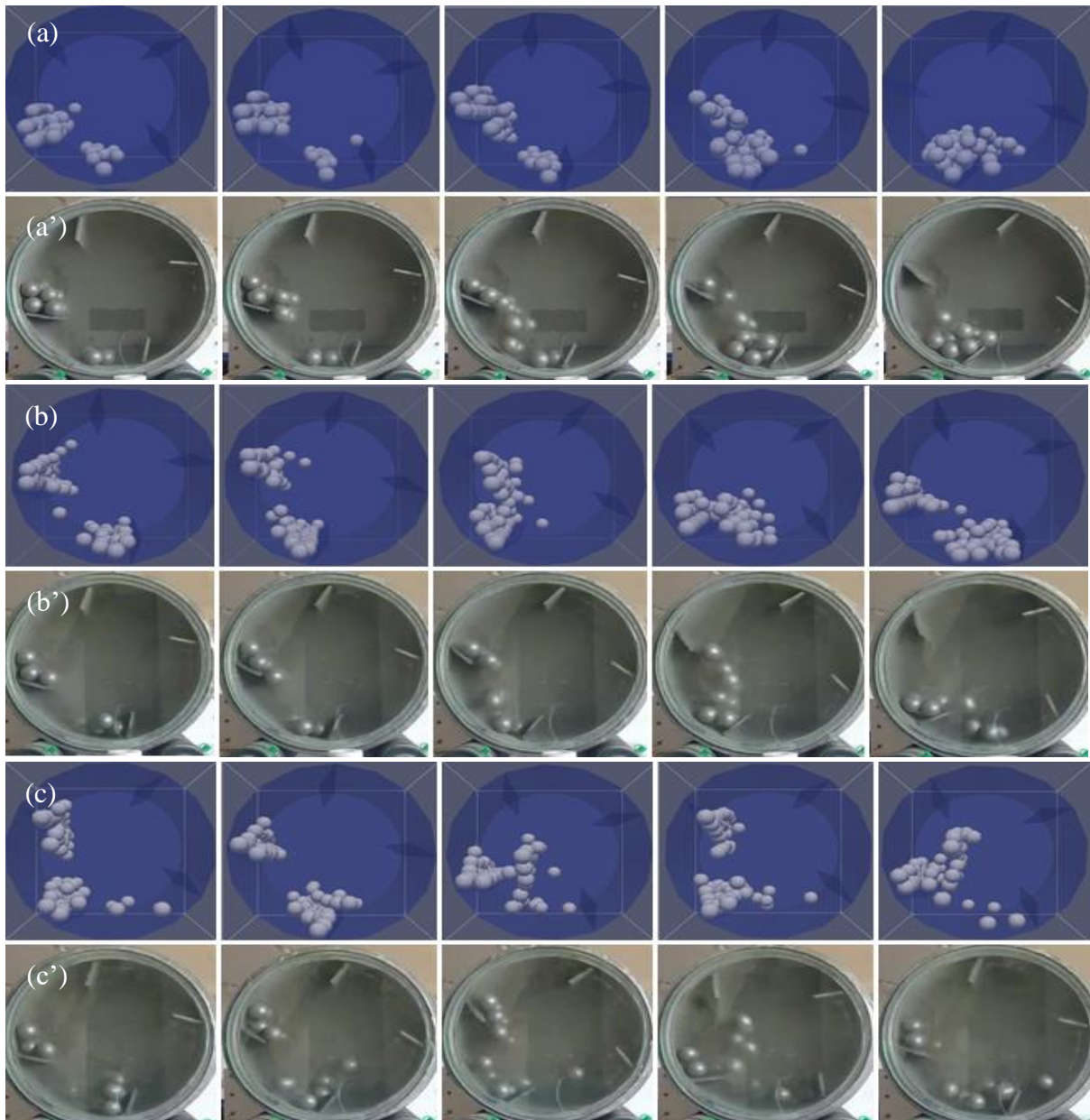
4.7 Simulações usando o DEM

A partir da obtenção dos parâmetros foi possível a realização das simulações com os valores de velocidade de rotação e fração de enchimento experimentais. A simulação da quebra das partículas de clínquer requer conhecimentos de balanços populacionais e cinética de quebra de partículas, fugindo do escopo desse trabalho. Por isso, foi avaliado exclusivamente a dinâmica dos corpos moedores dentro do equipamento.

Os resultados da simulação foram inicialmente comparados com o experimental, de forma a verificar sua equivalência, a Figura 4.8 ilustra os resultados. A partir da comparação, pode-se verificar a semelhança entre os resultados experimentais e os simulados, demonstrando que a simulação foi de qualidade e com boa precisão. Há uma pequena diferença entre as posições dos suspensores simulados e experimental, mas se deve ao fato do *software* Paraview

já gerar as imagens para o caso da simulação em passos de tempos específicos. Em contrapartida, para o teste experimental, utilizou-se um programa para cortar o vídeo em imagens, e estes possuem tempos diferentes para o corte.

Figura 4.8 – Comparação entre os resultados simulados para as velocidades de rotação de (a)15 (b)31 e (c)47 rpm e os resultados experimentais para as velocidades de rotação de (a')15, (b')31 e (c')47 rpm.



Fonte: Da autora (2019).

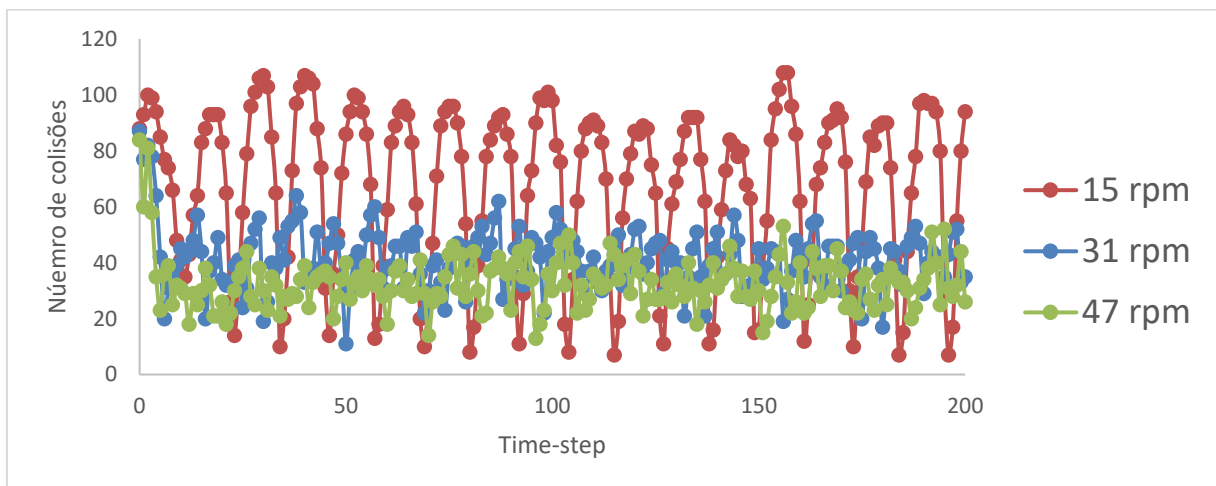
4.7.1 Número de colisões e forças de colisões

Como a quantidade de corpos moedores era constante, avaliou-se o efeito da velocidade

de rotação sobre a dinâmica dos corpos moedores. Uma vantagem de se utilizar a simulação Lagrangeana é poder acompanhar cada partícula individualmente, assim pode-se obter dados sobre o número de colisões dos corpos moedores com eles mesmos, como demonstrado na Figura 4.9.

Analisando a Figura 4.9, pode-se notar que o movimento dos corpos moedores dentro do moinho é cíclico. Isso acontece porque a limitação da carga de corpos moedores fez com que o volume ocupado pelas esferas não fosse suficiente para trabalhar com um leito completamente preenchido por partículas e, conseqüentemente, uniforme. Desta maneira, o momento em que a maior parte das partículas eram levantadas pelas hastes retangulares e caíam sobre o material no leito, apresentava um pico com o maior número de colisões para aquela velocidade.

Figura 4.9 – Número de colisões partícula-partícula.



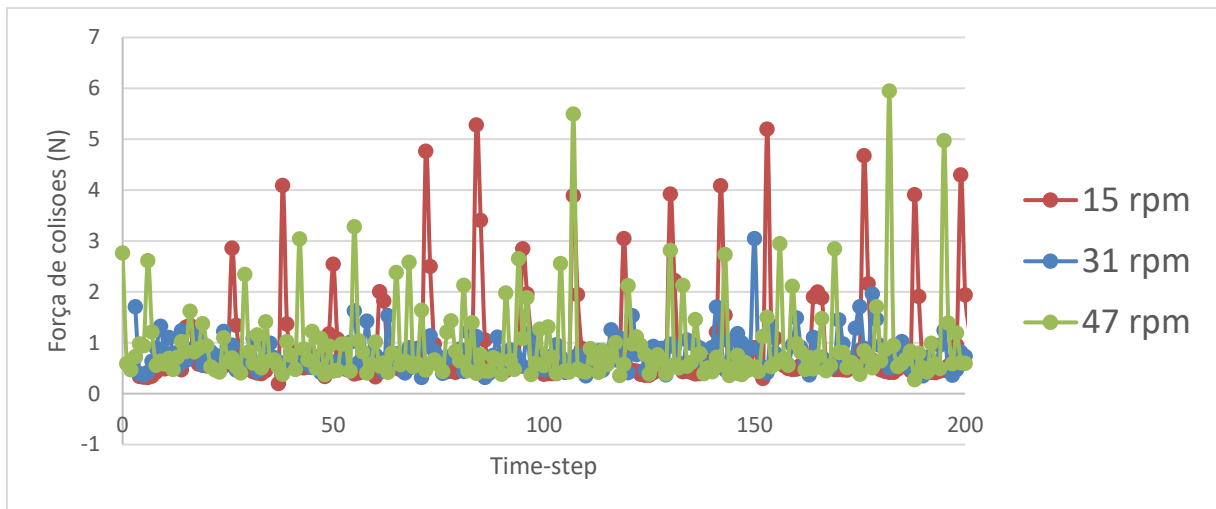
Fonte: Da autora (2019).

O tempo que o tambor cilíndrico leva para completar uma volta, e conseqüentemente um ciclo, depende da velocidade de rotação. Sendo assim, em 200 *time-steps* de simulação, apresentado na Figura 4.9, para 15 rpm os picos de número de colisões aparecem menos vezes do que os picos para 47 rpm, pois o número de voltas na velocidade mais baixa é menor. No entanto, apesar de um menor número de ciclos, observa-se que na velocidade de 15 rpm há mais colisões entre os corpos moedores se comparado às velocidades de 31 e 47 rpm. Este resultado não era esperado quando se comparado ao diâmetro obtido no final das moagens. Devido aos maiores diâmetros das partículas obtidas na velocidade de 15 rpm, esperava-se que houvesse menos colisões entre as partículas.

Analisou-se então, a força entre as colisões dos corpos moedores nas diferentes

velocidades, e a Figura 4.10 ilustra o resultado. Esperava-se que quanto maior a velocidade de rotação, maior seria também as forças de impacto entre as partículas. No entanto, observou-se que as forças de colisões foram maiores para 15 e 47 rpm. Para auxiliar na compreensão dos resultados analisou-se então a dinâmica dos leitos de partículas nas três velocidades de rotação. No entanto, anteriormente, realizou-se as mesmas análises de colisões partícula-partícula para as colisões partícula-parede. A Figura 4.11 mostra o número de colisões entre as partículas e a parede do moinho para as três velocidades de rotação estudadas.

Figura 4.10 – Força de colisões partícula-partícula.



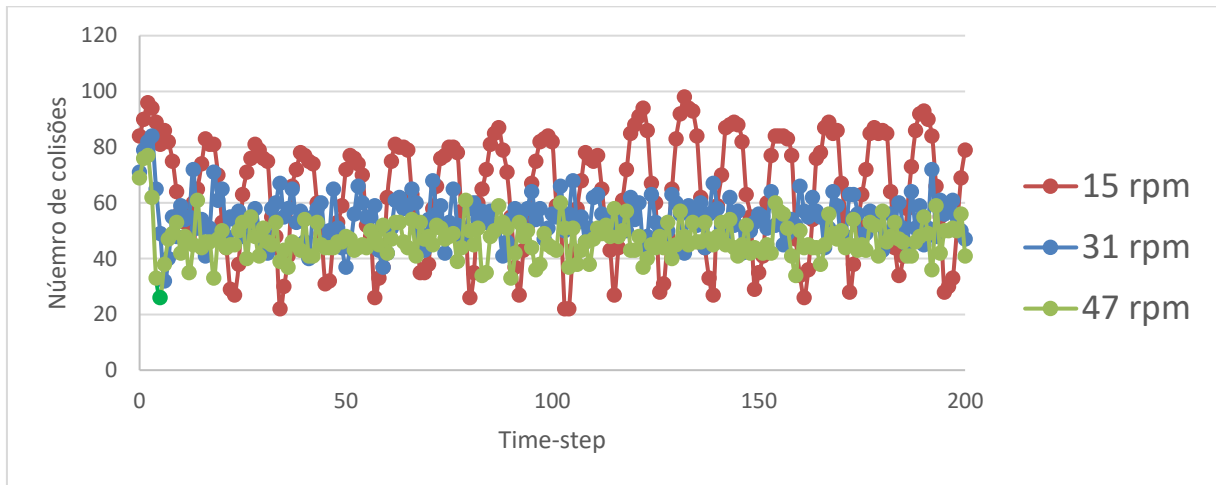
Fonte: Da autora (2019).

Nota-se que as maiores forças de colisões são referentes à velocidade de 15 rpm, representando que com uma menor velocidade, as partículas caem com maior força uma sobre as outras. Porém, devido ao fato de as partículas caírem umas em cima das outras, a força de contato entre elas é grande, mas não traduz em redução do material pela maior parcela de material estar localizado no outro lado de onde elas caem. Havendo assim, pouco impacto sobre o material, não fraturando-o completamente.

Pode-se notar na Figura 4.11 que o número de colisões entre as partículas e a parede é maior para a velocidade de 15 rpm, representando o maior contato dos corpos moedores com a parede do moinho. Esse resultado é devido ao fato de nas velocidades mais baixas de rotação, a quantidade de partículas lançadas pelos suspensores serem mais altas, sendo assim, há mais material em queda, aumentando o número de colisões com as paredes.

Além disso, o maior número de colisões entre partículas para 15 rpm, devido à restituição de energia entre elas, faz com que após as colisões partícula-partícula, imediatamente ocorra colisões partícula-parede.

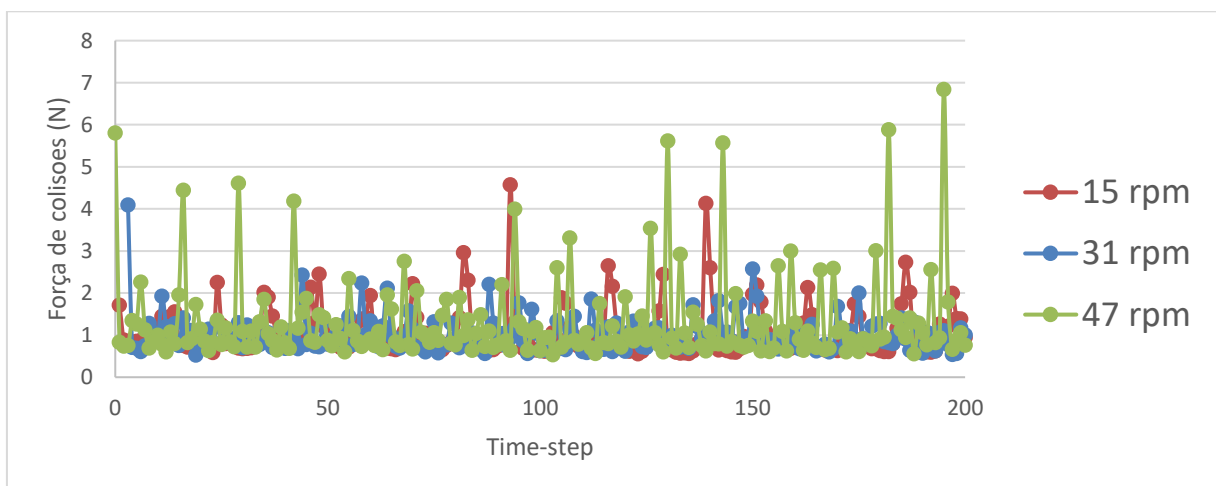
Figura 4.11 – Número de colisões partícula-parede.



Fonte: Da autora (2019).

Observando a Figura 4.12, nota-se que a maior força de colisão partícula-parede é para a velocidade de 47 rpm, devido ao fato de nessa velocidade, as partículas alcançarem maior altura, e conseqüentemente, caírem a uma maior distância, entrando em contato direto com a parede do moinho. Já para as velocidades de 15 e 31 rpm, devido ao amortecimento causado pela primeira colisão com as bolas, a força com que as partículas são lançadas até a superfície diminuem, e por isso, suas forças de colisões partícula-parede é menor.

Figura 4.12 – Força de colisões partícula-parede.

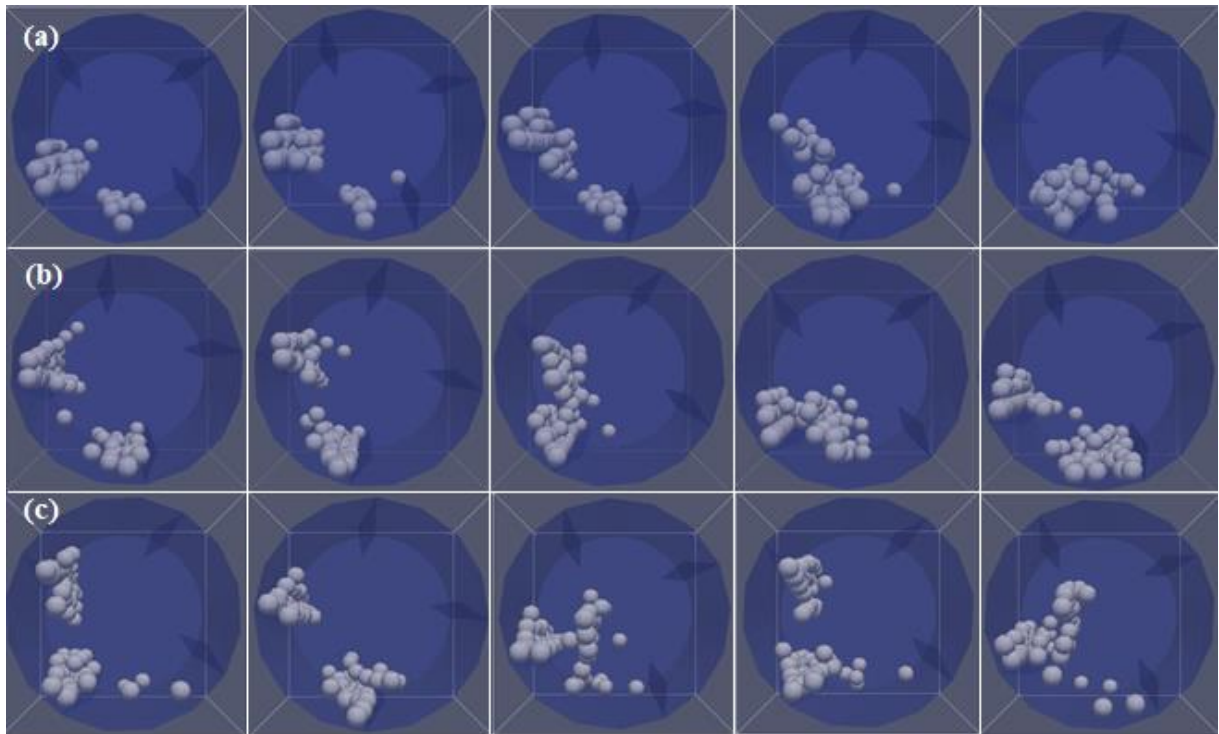


Fonte: Da autora (2019).

Para maior compreensão dos resultados mencionados acima, é necessário a compreensão dos diferentes comportamentos dos corpos moedores ao longo do tempo no experimento. Para isso, a Figura 4.13 representa as imagens geradas advindas das simulações

computacionais para as três velocidades estudadas.

Figura 4.13 – Imagens obtidas a partir das simulações em cinco intervalos para os tempos de moagens equivalentes a (a) 15 rpm, (b) 31 rpm e (c) 47 rpm representados na horizontal.



Fonte: Da autora (2019).

Observando a Figura 4.13, pode-se perceber que para a velocidade menor, de 15 rpm, os corpos moedores caem diretamente em cima dos demais corpos moedores que estão no fundo do tambor. Devido a esse fato, o número de colisões entre as bolas esféricas é maior e também devido a isso a força de colisão entre elas é maior. O contato partícula-partícula nas demais velocidades é menor, pois nelas a maioria dos corpos caem a uma distância maior no tambor, havendo menor quantidade de corpos moedores na superfície onde elas caem.

Para a velocidade de 15 rpm, a força de colisão partícula-parede é a menor dentre as velocidades estudadas. Fato esse justificado devido ao amortecimento causado pelo primeiro contato com os corpos moedores e por isso, a força da colisão da partícula com a superfície do cilindro é menor.

Além disso, comparando as alturas que as esferas moedoras conseguem atingir antes da queda, pode-se notar que a de menor altura é equivalente a velocidade mais baixa, de 15 rpm, e esta possui maior diâmetro de partícula, isso ocorre pelo fato do caminho percorrido pelo corpo antes de sofrer o impacto ser menor, diminuindo assim a energia no impacto. Isso pode ser justificado também pelo contato partícula-partícula ser muito grande, diminuindo o contato

partícula-material, em consequência, menor fratura.

Para a velocidade de rotação de 31 rpm, nota-se que na queda livre dos corpos moedores, parte deles se chocam diretamente com a parede do moinho, enquanto uma pequena parte se choca com algumas bolas que estão sendo carregadas. A força de colisão entre partícula e parede do moinho é maior se comparado à velocidade anterior, isso justifica ao fato de parcela das partículas entrarem diretamente em contato com a superfície após sua queda. Porém é menor que a velocidade de 47 rpm por haver um amortecimento causado pelo choque com as demais bolas esféricas durante a queda, diminuindo a energia de queda das partículas.

Já para a velocidade de rotação de 47 rpm, o número de colisões entre as bolas é menor pois a sua queda ocorre de maneira mais espaçada, não havendo tanto contato umas com as outras. No entanto, o número de colisões partícula-parede é maior e a força com que elas ocorrem são maiores se comparado aos demais resultados das velocidades, devido a carga moedora entrar em contato direto com a parede do moinho após sua queda.

Devido a todos esses resultados, era de se esperar que o diâmetro da partícula para a velocidade de 47 rpm fosse o menor, devido ao comportamento dos corpos moedores que empõem uma maior força de impacto sobre o leito de material, ocorrendo a fratura de maneira mais eficaz. Porém, devido a localização que se encontra o material, não são todos os corpos moedores que entram em contato com o material, por isso, não ocorre uma moagem efetiva. E como na velocidade de 15 rpm os corpos moedores não alcançam uma distância de queda grande, e caem sobre os demais corpos moedores, o contato partícula-partícula é grande, no entanto, o contato partícula-parede é menor, e por isso, apresentou diâmetros maiores, se comparado ao mencionado anteriormente. Já para a velocidade de 31 rpm, seu resultado encontra-se intermediário e apresentou, no geral, menores diâmetros.

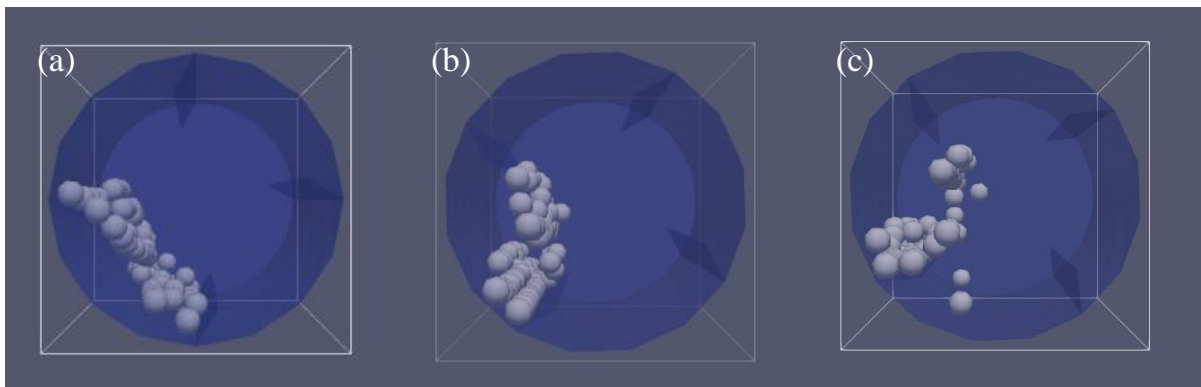
O resultado obtido na Tabela 4.1, em que o menor diâmetro da partícula para a velocidade de 15 rpm foi obtido com a fração de enchimento de material a ser moído correspondente ao valor de 5%, deve-se ao fato, de nessa fração de material, haver maior contato dos corpos moedores com o material que está sobre a parede do moinho. Afinal, em uma menor velocidade, os corpos moedores caem diretamente em cima dos demais, e conseqüente, caem sobre a parede do moinho em uma menor distância que as demais velocidades.

4.7.2 Regime de escoamento

Outra questão a ser notada a partir das simulações é o regime de escoamento dos corpos

moedores no interior do tambor cilindro rotativo, conforme representado pela Figura 4.14. Observando essa figura, pode-se perceber que conforme aumenta-se a velocidade de rotação, maior a altura que os corpos moedores conseguem alcançar e maior sua distância de queda na superfície do moinho, compreendendo assim, maiores valores de *shoulder* e *toe* da carga moedora.

Figura 4.14 – Comparação dos regimes das simulações realizadas para diferentes velocidades (a) 15 rpm, (b) 31 rpm e (c) 47 rpm.



Fonte: Da autora (2019).

Para a moagem a 47 rpm, equivalente a 53% da velocidade crítica, a dinâmica da carga compreende o regime de catarateamento, sendo o requerido para bons resultados de moagens. Porém para a velocidade de 15 e 31 rpm, correspondentes a cerca de 17% e 35% da velocidade crítica, era esperado o regime de cascadeamento, e que as partículas rolassem uma sobre as outras. No entanto, como o leito de carga e material não foi totalmente preenchido e devido a presença de suspensores, responsáveis por alterar o regime, não ocorreu o regime de cascadeamento. Conseqüentemente, na velocidade de 47 rpm poderia se obter um produto final de menor diâmetro. Já para as velocidades de 15 e 31 rpm deveria se obter um produto de maior diâmetro, caracterizado pelo regime de cascadeamento. Além disso, devido ao não preenchimento do leito, ocupando 50% do volume do moinho, indicado pela literatura, os suspensores não utilizaram sua capacidade máxima de carregar a carga moedora e assim proporcionar seu maior alcance.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que para valores intermediários de velocidades e menores frações de enchimento do material obtém-se melhores resultados, apresentando menores diâmetros das partículas e, conseqüentemente, maior efetivação da moagem. Porém, têm-se uma faixa de valor ideal para a obtenção do menor diâmetro possível, que a partir da técnica de superfície de resposta, verificou-se que esta corresponde a 35 a 40 rpm e de 4 a 5% da fração de enchimento de clínquer a ser moído. O tempo em que o material particulado permanece em moagem também influencia no resultado, para maiores tempos, menores diâmetros obtidos. Verificou-se que é possível realizar a calibração dos coeficientes necessários para simulação a partir da comparação dos ângulos de *shoulder* e *toe* da carga moedora simulados com o experimental, através de imagens.

Devido ao não enchimento total do leito de cargas e material no interior do moinho e a presença de suspensores, não foi possível observar o regime de cascadeamento, porém o regime de catarateamento foi observado de forma efetiva e apresentou bom resultado. Ademais, conclui-se que apesar do número de colisões e as forças de colisões entre os corpos moedores serem maiores para a velocidade de 15 rpm, essa velocidade apresentou maior diâmetro médio de Sauter. Isso deve-se ao fato de o contato partícula-partícula ser muito grande, diminuindo o contato partícula-material, em consequência, menor fratura.

Além disso, os diâmetros das partículas obtidos nas velocidades de 31 e 47 rpm foram próximos, o que não era esperado. A partir das imagens geradas da simulação, pode-se entender esse resultado, que se justifica-se devido a localização de queda da carga moedora. Ademais, observou-se que o comportamento dos corpos moedores apresentados nas simulações, foram próximos dos experimentais.

De maneira geral, a partir dos dados coletados, foi possível avaliar aspectos importantes para moagem, como as variáveis que influenciam na moagem, análise granulométrica e o comportamento da carga moedora no interior do moinho. O trabalho permitiu a compreensão desses conceitos e aprimoração do conhecimento, além de salientar a importância da simulação para compreensão da dinâmica das cargas, construção e resolução de problemas da engenharia. Por fim, ficou evidente que é possível reduzir os custos energéticos da operação de moagem, através do estudo do comportamento da carga moedora. Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo fundamentados sobre um referencial teórico e análise crítica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISSA, A. A.; DUCHESNE, C.; RODRIGUE, D. Transverse mixing of polymer powders in a rotary cylinder part I: Active layer characterization. **Powder Technology**, vol. 219, p. 193-201, mar. 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591011007236>>. Acesso em: 01 nov. 2019.

ALVES, V. K. **Otimização de carga moedora utilizando ferramentas de modelamento matemático e simulação de moagem**. 2006. 122 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/637M.PDF>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

ARAÚJO, B. S. A. et al. **Simulação DEM do empacotamento de sementes de acerola**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11, 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: 2015. p. 2-7. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Marielle_Francisquetti/publication/300147762_SIMULACAO_DEM_DO_EMPACOTAMENTO_DE_SEMENTES_DE_ACEROLA/links/57c6ed8308aefc4af34c7745/SIMULACAO-DEM-DO-EMPACOTAMENTO-DE-SEMENTES-DE-ACEROLA.pdf>. Acesso em: 5 set. 2019.

CARVALHO, R. C. de. **Projeto de um mini-moinho vibratório auxiliado por técnicas de metodologia de projeto**. 2006. 149 p. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18146/tde-19012011-140304/en.php>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

CARVALHO, R. M.; TAVARES, L. M. **Modelagem mecanicista da moagem**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 24, 2011, Salvador. **Anais...** Salvador: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. p. 765-775. Disponível em: <https://www.artigos.entmme.org/download/2011/modelagem_e_simulacao/2236%20-%20R.M.%20Carvalho_L.M.%20Tavares%20-%20MODELAGEM%20MECANICISTA%20DA%20MOAGEM.pdf>. Acesso em: 3 set. 2019.

CENTURIONE, S. L. **A mineralização do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos**. 1999. 156 p. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-19112015-085440/en.php>>. Acesso em: 19 ago. 2019.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 5ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CLEARY, P. W. Charge behavior and power consumption in ball mills: sensitivity to mill operation conditions, liner geometry and charge composition. **International Journal of Mineral Processing**, vol. 63, n. 2, p. 79-114, ago. 2001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751601000370>>. Acesso em: 1

out. 2019.

CLEARY, P. W.; MORRISON, R.; MORREL, S. Comparison of DEM and experiment for a scale model SAG mil. **Int. J. Miner. Process.** v. 68, n. 1-4, p. 129-165, jan. 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751602000650>>. Acesso em: 01 nov. 2019.

CLEARY, P. W.; OWEN, P. **Effect of operating condition changes on the collisional environment in a SAG mil.** Minerals Engineering v.123, n. 1, p. 297-315, mar. 2019.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089268751830298X>>. Acesso em: 01 nov. 2019.

CLEARY, P. W.; OWEN, P. The relationship between charge shape characteristics and fill level and lifter height for a SAG mill. **Minerals Engineering** v. 83, p. 19-32, nov. 2015.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687515300583>>. Acesso em: 01 nov. 2019.

CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos.** São Paulo: Editora Blücher, 2012.

DANBY, M.; SHRIMPTON, J.; PALMER, M. On the optimal numerical time integration for DEM using Hertzian force models. **Computers and Chemical Engineering**, v. 58, p. 211–222, nov. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.06.018>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

DE LIMA, A. B. **O processo produtivo do cimento portland.** 2011. 39 p. Monografia (Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Mineraiis)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em:

<<http://www.ceermin.demin.ufmg.br/monografias/34.PDF>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

DOS SANTOS, V. G. **Prototipagem virtual de equipamento de manuseio de granéis em escala piloto usando DEM.** 2018, 67 p. Projeto (Graduação em Engenheiro Metalúrgico)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em:

<<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10023755.pdf>>. Acesso em: 6 set. 2019.

FOGAGNOLO, J. B. **Estudo do processo de fabricação de materiais compostos de matriz de alumínio por metalurgia do pó, via moagem de alta energia e extrusão.** 2000. 231 p.

Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/263675>>. Acesso em: 5 set. 2019.

FOGGIATTO, B. **Previsão de desempenho do circuito de moagem de Carajás.** 2009. 232 p. Tese (Mestrado em Engenharia Mineral)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-03072009-140900/en.php>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

GOBBO, L. de A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração**

de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld. 2003. p. 4-16. Tese (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-09102003-112552/en.php>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

GOBBO, L. de A. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland.** 2009. 273 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia)-Universidade de São Paulo Instituto de Geociências, São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44137/tde-23072009-144653/en.php>>. Acesso em: 1 ago. 2019.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa.** 2003. 165 p. Tese (Mestrado em Arquitetura)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-07072003-160408/pt-br.php>>. Acesso em: 24 nov. 2019.

GRAVENA, G. F. et al. **Estudo da influência dos coeficientes de atrito estático e fricção de rolamento em simulações DEM de tambores rotativos com suspensores.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2019, Uberlândia. **Anais...** Uberaba, 2019. 9 p. Disponível em: <<http://www.cobeqic2019.com.br/trabalhos finais/SOCP47.pdf>>. Acesso em: 6 set. 2019.

HEMA, V. **Mathematical modelling of the dynamics of granular materials in a rotating cylinder.** 2003. 185 p. Tese (Doutorado)-The Cochin University of Science and Technology, Índia, 2003. Disponível em: <<http://ir.niist.res.in:8080/xmlui/handle/123456789/1173>>. Acesso em: 31 out. 2019.

JIMÉNEZ-HERRERA, N. **Aplicação de modelos de quebra de partículas do ambiente de simulação do método dos elementos discretos no estudo de microprocessos de cominuição.** 2017. 222 p. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/7322>>. Acesso em: 3 set. 2019.

JUAREZ, G.; CHEN, P.; LUEPTOW, R.M. Transition to centrifuging granular flow in rotating tumblers: a modified Froude number, **New Journal of Physics**, vol. 13, p. 1-12, 2011. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/13/5/053055/pdf>>. Acesso em: 31 out. 2019.

KALLEMBACK, R. D. C. **Investigação da moagem de misturas binárias em moinhos de bolas.** 2012. 139 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/RaquelDominguesCostaKallemback.pdf>. Acesso em: 12 set. 2019.

LIMA, A. A. A. **Estudo do modelo de contato para avaliar a dinâmica de corpos moedores em moinhos de bolas utilizando o método dos elementos discretos.** 2018. 130 p. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/7176>>. Acesso em: 03 nov. 2019.

LIMA, R. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a abordagem numérica Lagrangeana** 2017, 82 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21261>>. Acesso em: 24 out. 2019.

MACHADO, M. V. C. **Estudo experimental e numérico da dinâmica de corpos moedores em moinhos de bola**. 2016. 99 p. Dissertação de mestrado em Engenharia Química-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15264>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 3, n. 1 p. 75-96, jan. 2012 Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/12110>>. Acesso em: 2 ago. 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**, 2001, 92 p. Disponível em: <http://matteopro.com/images/materiali-non-convenzionali/Concrete_microstrutture_-_book.pdf>. Acesso em: 31 out. 2019.

NASATO, D. S. **Desenvolvimento de acoplamento numérico entre o método dos elementos discretos (DEM) e o método dos elementos finitos**. 2011. 94 p. Tese (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/266925>>. Acesso em: 3 set. 2019.

NASCIMENTO, Suellen Mendonça et al. **Estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório com suspensores: análise experimental e numérica utilizando abordagens euleriana e lagrangeana**. 2018. 108 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21462>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

NUNES, A. de. L. **Modelagem e simulação do circuito de moagem da Votorantim Metais Zinco Morro Agudo**. 2012. 118 p. Tese (Mestrado em Engenharia Mineral)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-14062013-142637/en.php>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

OLIVEIRA, G. A. R. N. **Critérios de Projeto para moinhos de cimento Portland**. 2012, 107 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Química UFRJ, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.ambientesquimicos.eq.ufrj.br/Nosso_ambito_3_files/2012GARNO-AZDPI-EQ-UFRJ-CriteriosdeProjetoParaMoinhosdeCimentoPortland.pdf>. Acesso em: 24 out. 2019.

POWEEL, M.S.; MCBRIDE, A. T. A three-dimensional analysis of media motion and grinding regions in mills. **Minerals Engineering**, v. 17, n. 11-12, p. 1099-1109, nov./dez. 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089268750400192X>>. Acesso em: 31 out. 2019.

RAJAMANI, R. K.; VENUGOPAL, R. 3D simulation of charge motion in tumbling mills by the discrete element method. **Powder Technology**, vol. 115, n. 2, p. 157-166, abr. 2001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003259100003338>>.

Acesso em: 20 nov. 2019.

RAMOS, E. S.; CARVALHO, R. M.; TAVARES, L. M. **Simulação do movimento da carga em moinhos de bolas utilizando o método dos elementos discretos**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 14, 2011, Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. p. 440-442. Disponível em: <https://www.artigos.entmme.org/download/2011/modelagem_e_simula%C3%A7%C3%A3o/2236%20-%20R.M.%20Carvalho_L.M.%20Tavares%20-%20MODELAGEM%20MECANICISTA%20DA%20MOAGEM.pdf>. Acesso em: 12 set. 2019.

RIBEIRO, M. J. P. M.; ABRANTES, J. C. C. Moagem em moinho de bolas: Estudo de algumas variáveis e otimização energética do processo. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 7-11, mar./abr. 2001. Disponível em: <<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876570b7f8c9d6e028b4640/pdf/ci-6-2-5876570b7f8c9d6e028b4640.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

RIBEIRO, M. R. **Investigação das características dos minérios de ferro da CVRD que influenciam seu comportamento na moagem**. 2004. 129 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais)-Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2774>>. Acesso em: 25 ago. 2019.

ROCHA, E. P. et al. Planejamento Fatorial para a Investigação das Propriedades Espectroscópicas, Efeitos Relativísticos e de Solvatação de Derivados Halogenados da 2-Amino-1, 4-Naftoquinona. **Processos Químicos**, v. 9, n. 18, p. 81-87, dez. 2015. Disponível em: <http://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq_n1/article/view/262/254>. Acesso em: 9 dez. 2019.

RODRIGUEZ, V. A. **Modelo mecanicista UFRJ aplicado à cominuição em moinhos de bolas descontínuos**. 2016, 149 p. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/-7/2016-2/260--240/file>>. Acesso em: 01 out. 2019.

SANTOS, D. A. dos. **Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas granulares em um tambor rotatório**. 2015, 157 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15091>>. Acesso em: 29 out. 2019.

SANTOS, L. B. A indústria de cimento no Brasil: origens, consolidação e internacionalização. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 23, n. 1, p. 77-94, abr. 2011. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/3213/321327201007.pdf>>. Acesso em: 1 set. 2019.

SILVA, A. C. **Simulação de moagem implementada a partir do modelo de Austin**. 2003, 213 p. Tese (Mestrado em Engenharia Mineral)- Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3119/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Si mula%C3%A7%C3%A3oMoagemImplementada.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2019.

SHIERITT, R. G. et al. Axial dispersion in the three-dimensional mixing of particles in a rotating drum reactor. **Chemical Engineering Science**, vol. 58, n. 2, p. 401-415, jan. 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250902005511>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

SHIN, H. et al. Effect of ball size and powder loading on the milling efficiency of a laboratory-scale wet ball mill. **Ceramics International**, v. 39, n. 8, p. 8963–8968, dez. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027288421300494X>>. Acesso em: 01 nov. 2019.

SOUZA, M. de O. et al. Análise exploratória das concentrações dos metais Na, Ca, Mg, Sr e Fe em extrato aquoso de petróleo, determinados por ICP OES, após otimização empregando planejamento de experimentos. **Quim. Nova**, São Paulo, v.38, n. 7, p. 980-986, abr. 2015. Disponível em: <<http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/NT20150030.pdf>>. Acesso em: 1 ago. 2019.

SOUZA, V. C. G. de. **Influência das características mineralógicas, físicas e químicas dos clínqueres de cimento Portland sobre sua moabilidade**. 2007. 396 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/12152>>. Acesso em 30 jul. 2019.

SOUZA, V. C. G. de. **Modelagem matemática e simulação do circuito de moagem de cimento**. 2002. 124 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Minas)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/16314>>. Acesso em: 15 jul. 2019.

TEIXEIRA, J. F. N. **Modelação de elementos estruturais reforçados com compósitos de FRP recorrendo ao método dos elementos discretos**. 2014. 124 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil)-Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014. Disponível em: <<https://run.unl.pt/handle/10362/13009>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

VON KRUGER, F. L. **Corpos moedores côncavos**. 2004. 145 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Metalúrgica e de Minas)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: <<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/203D.PDF>>. Acesso em: 20 jul. 2019.

YOVANOVIC, A. P. **Engenharia da comunicação e moagem em moinhos tubulares**. Editado por Alexis Yovanovic, 2006. Disponível em: <<http://www.modelooperacional.com.br/wp-content/uploads/2019/04/Engenharia-da-Comunicacao-e-Moagem-em-Moinhos-Tubulares.pdf>>. Acesso em: 5 set. 2019.

ZAMPIERI, V. A. **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico**. 1993. 233 p. Tese (Doutorado)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-25062015-102757/en.php>>. Acesso em: 25 ago. 2019.