



AMANDA CRISTINA GOMES MACHADO

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE MOAGEM DE CLÍNQUER
EM UM MOINHO DE BOLAS**

LAVRAS – MG

2019

AMANDA CRISTINA GOMES MACHADO

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE MOAGEM DE CLÍNQUER EM UM 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 Bacharel.

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

**LAVRAS – MG
2019**

AMANDA CRISTINA GOMES MACHADO

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE MOAGEM DE CLÍNQUER EM UM MOINHO DE
BOLAS**

STUDY OF CLINKER GRINDING EFFICIENCY IN A BALL MILL

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

APROVADA em 11 de dezembro de 2019.

Prof^a. Dr^a. Iara Hernandez Rodriguez UFLA

Prof. Dr. João Moreira Neto UFLA

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

**LAVRAS – MG
2019**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, por me dar força para vencer essa batalha e não me deixar desistir. À Nossa Senhora Aparecida, pela constante intercessão e por sempre me cobrir com seu manto sagrado.

Aos meus pais, Nilza e Darley, e ao meu irmão, Leandro, por todo o apoio, carinho e compreensão. Obrigada por acreditarem na minha capacidade e por tornarem possível essa trajetória!

Aos meus avós, Maria e Arsênio, Ana e Joaquim, obrigada pelas palavras motivadoras e por tudo o que fizeram por mim!

Aos meus amigos da UFLA, Nathiele, Nayara, Marcela, Geraldo e Caroline, agradeço imensamente por todo o suporte, pelos sorrisos e por sempre compartilharem suas experiências e sentimentos! Vocês foram fundamentais nessa jornada!

À minha amiga, Amanda, agradeço por todas as vezes em que estive ao meu lado durante esses cinco anos e por me dar apoio em todos os momentos, bons ou ruins, que vivemos. Obrigada pela grande parceria que formamos e pela grande amizade que durará pelo resto da vida!

Agradeço à Suellen, por muito contribuir para que este trabalho fosse realizado. Obrigada pelo tempo e pela paciência disponibilizados e, também, por toda ajuda.

Agradeço ao Departamento de Engenharia e aos técnicos, Felipe e Shirley, por todo o suporte.

Às professoras Iara e Isabele, por disponibilizarem os laboratórios que utilizamos para a realização dos experimentos deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho acontecesse, muito obrigada!

RESUMO

A moagem em um moinho de bolas é um processo bastante importante em várias plantas químicas de vários segmentos e consiste, basicamente, em um tambor que gira em torno de seu próprio eixo e que contém, em seu interior, corpos moedores e o material a ser moído. Visto que a moagem é uma operação que exige um alto gasto de energia em uma indústria, estudá-la a fundo é importante para uma maior otimização do processo, garantindo um produto de melhor qualidade e prevenindo gastos desnecessários. Pretendeu-se com este trabalho, estudar o processo de moagem de clínquer em um moinho de bolas, analisando a influência de variáveis, como velocidade de rotação e quantidade de corpos moedores. Para isso, foram realizados experimentos, variando-se as velocidades em 15, 31 e 47 rpm e as frações de enchimento em 2, 4 e 6% em volume de corpos moedores. Posteriormente, foram calculados os diâmetros médios de *Sauter* para esses experimentos e feita uma análise estatística dos dados. Foram realizadas também simulações para comparação com os resultados experimentais e posterior explicação para alguns comportamentos observados na prática. Com isso, foi possível concluir que todas as moagens se apresentaram satisfatórias logo nos primeiros 5 minutos de moagem, visto que os diâmetros, em todas as velocidades de rotação, nesse tempo, apresentaram valores consideravelmente menores do que o diâmetro inicial encontrado para as partículas. Dentre todas as quantidades de corpos moedores, o experimento com 4% foi o que apresentou maior diminuição dos diâmetros, após 15 minutos de moagem, se comparados ao inicial. Quanto às velocidades, os experimentos a 2 e 6% em volume de carga moedora apresentaram melhor moagem a 31 rpm. Já no experimento a 4% em volume de bolas, a velocidade de 15 rpm apresentou menor diâmetro, em relação ao inicial, após 15 minutos de moagem. Para as análises das superfícies de resposta, concluiu-se que, em todos os tempos de moagem, os menores diâmetros foram alcançados tanto em velocidades quanto em frações de enchimento intermediárias. Isso não foi exatamente observado na prática, pois o experimento a 4% em volume de carga moedora, teve como melhor velocidade de moagem, 15 rpm. Essa diferença entre o ajuste e o experimental é devida ao fato de o valor de R^2 da superfície de resposta a 15 minutos não ser tão próximo de 1. Analisando-se as colisões entre partícula-partícula e as colisões partícula-parede, observou-se que, à medida que a fração de bolas dentro do moinho aumenta, o número de colisões também aumenta em ambas as análises. As forças de colisão entre as partículas são maiores para o tambor operando com 4% do volume preenchido por corpos moedores, o que se observa também nos resultados experimentais, visto que o experimento com essa fração de enchimento foi o que apresentou menores diâmetros ao final da moagem. Este trabalho permitiu perceber a importância de se realizar um estudo detalhado do processo de moagem, incluindo simulações, para que todas as influências das variáveis sejam previstas e manipuladas para o sucesso da moagem.

Palavras-chave: Moinho de bolas. Clínquer. DEM.

ABSTRACT

Grinding in a ball mill is a very important process in several chemical plants of various segments and basically consists of a drum that revolves around its own axis and contains, in its interior, grinding bodies and the material to be ground. Since grinding is an operation that requires a high expenditure of energy in an industry, studying it in depth is important for a greater optimization of the process, ensuring a product of better quality and preventing unnecessary costs. The purpose of this work was to study the clinker grinding process in a ball mill, analyzing the influence of variables such as rotation speed and number of grinding bodies. For this purpose, experiments were performed, varying the speeds in 15, 31 and 47 rpm and the filling fractions in 2, 4 and 6% in volume of grinding bodies. Subsequently, the mean Sauter diameters were calculated for these experiments and a statistical analysis of the data was performed. Simulations were also performed for comparison with experimental results and further explanation for some behaviors observed in practice. Thus, it was possible to conclude that all milling was satisfactory within the first 5 minutes of milling, since the diameters, at all rotational speeds, at this time, showed values considerably lower than the initial diameter found for the particles. Among all the quantities of grinding bodies, the experiment with 4% was the one that showed the greatest decrease in diameters after 15 minutes of grinding, when compared to the initial one. Regarding velocities, the experiments at 2 and 6% in grinding load volume showed the best grinding at 31 rpm. In the experiment at 4% in ball volume, the 15 rpm velocity presented a smaller diameter than the initial one after 15 minutes of grinding. For the analysis of the response surfaces, it was concluded that, in all grinding times, the smallest diameters were reached both in velocities and in intermediate filling fractions. This was not exactly observed in practice, because the experiment at 4% in volume of grinding load, had the best grinding speed, 15 rpm. This difference between the adjustment and the experimental one is due to the fact that the R² value of the 15-minute response surface is not so close to 1. Analyzing the collisions between the particle-particle and the particle-wall collisions, it was observed that, as the ball fraction inside the mill increases, the number of collisions also increases in both analyses. The collision forces between the particles are higher for the drum operating with 4% of the volume filled by grinding bodies, which is also observed in the experimental results, since the experiment with this filling fraction was the one with the smallest diameters at the end of grinding. This work allowed us to realize the importance of performing a detailed study of the grinding process, including simulations, so that all the influences of the variables are predicted and manipulated for the success of the grinding.

Keywords: Ball mill. Clinker. DEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma geral do processo de fabricação do cimento.	16
Figura 2.2 – Representação de um moinho de bolas em uma visão geral e outra, lateral.	18
Figura 2.3 – Subdivisões dentro dos moinhos de bolas.	20
Figura 2.4 – Regimes de escoamento dos corpos moedores.	21
Figura 2.5 – Demonstração dos ângulos <i>shoulder</i> e <i>toe</i> em uma simulação, onde os corpos moedores estão apresentados em vermelho e o minério, em azul.	24
Figura 3.1 - Amostras iniciais de clínquer.	27
Figura 3.2 - Módulo de moagem utilizado para a realização dos experimentos no LPSM.	28
Figura 3.3 – Obtenção do ângulo <i>shoulder</i> para a simulação (a) e para o ensaio experimental (b).	33
Figura 3.4 - Obtenção dos ângulos de <i>toe</i> para a simulação (a) e para o ensaio experimental (b).	33
Figura 4.1 – Distribuição dos diâmetros encontrados para as 6 amostras iniciais, pelo programa Image J.	35
Figura 4.2 - Moagem com 2% de corpos moedores a 15 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.	36
Figura 4.3- Moagem com 2% de corpos moedores a 31 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.	36
Figura 4.4 - Moagem com 2% de corpos moedores a 47 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.	37
Figura 4.5 - Moagem com 4% de corpos moedores a 15 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.	38
Figura 4.6 - Moagem com 4% de corpos moedores a 31 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.	39
Figura 4.7 - Moagem com 4% de corpos moedores a 47 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.	39
Figura 4.8 - Moagem com 6% de corpos moedores a 15 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.	41
Figura 4.9 - Moagem com 6% de corpos moedores a 31 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.	41
Figura 4.10 - Moagem com 6% de corpos moedores a 47 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.	41
Figura 4.11 - Amostra inicial de clínquer.	42
Figura 4.12 - Amostra final da moagem com 2% de corpos moedores a 15, 31 e 47 rpm, respectivamente.	43
Figura 4.13 - Amostra final da moagem com 4% de corpos moedores a 15, 31 e 47 rpm, respectivamente.	43

Figura 4.14 - Amostra final da moagem com 6% de corpos moedores a 15, 31 e 47 rpm, respectivamente.....	43
Figura 4.15 – Superfície de resposta para os diâmetros encontrados pelo peneiramento de 100 gramas das amostras, após 5 minutos de moagem, em relação à velocidade de moagem e fração de enchimento.....	46
Figura 4.16 – Superfície de resposta para os diâmetros encontrados pelo peneiramento de 100 gramas das amostras, após 10 minutos de moagem, em relação à velocidade de moagem e fração de enchimento.....	47
Figura 4.17 – Superfície de resposta para os diâmetros encontrados pelo peneiramento de 100 gramas das amostras, após 15 minutos de moagem, em relação à velocidade de moagem e fração de enchimento.....	48
Figura 4.18 - Superfície de resposta para os diâmetros encontrados, após o peneiramento total das amostras, em relação à velocidade de moagem e fração de enchimento.	49
Figura 4.19 - Número de colisões partícula-partícula a 15 rpm.....	50
Figura 4.20 - Força de colisões partícula-partícula a 15 rpm.....	51
Figura 4.21 - Número de colisões partícula-parede a 15 rpm.	53
Figura 4.22 - Força de colisões partícula-parede a 15 rpm.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Especificações dos nove experimentos de moagem realizados.....	29
Tabela 3.2 – Valores de coeficiente de atrito estático, coeficiente de atrito de rolamento e coeficiente de restituição para o aço.	31
Tabela 3.3 – Valores dos coeficientes codificados e reais para as 16 simulações realizadas.	32
Tabela 3.4 – Números de módulos de <i>Young</i> , razão de <i>Poison</i> e força de cisalhamento, necessários para o código das simulações dos experimentos.....	33
Tabela 4.1 – Diâmetro médio das partículas calculados pela Equação 3.1 após 5, 10 e 15 minutos de moagem, a diferentes velocidades.	38
Tabela 4.2 - Diâmetro médio das partículas calculado pela Equação 3.1, após 5, 10 e 15 minutos de moagem, a diferentes velocidades.	39
Tabela 4.3 - Diâmetro médio das partículas calculados pela Equação 3.1, após 5, 10 e 15 minutos de moagem, a diferentes velocidades.	42
Tabela 4.4 – Comparação entre os diâmetros calculados para o peneiramento do total da amostra moída e para o peneiramento de 100 gramas das amostras nos experimentos com 2% de corpos moedores.	44
Tabela 4.5 – Comparação entre os diâmetros calculados para o peneiramento do total da amostra moída e para o peneiramento de 100 gramas das amostras nos experimentos com 4% de corpos moedores.	44
Tabela 4.6 – Comparação entre os diâmetros calculados para o peneiramento do total da amostra moída e para o peneiramento de 100 gramas das amostras nos experimentos com 6% de corpos moedores.	45
Tabela 4.7 – Valores dos coeficientes da simulação 7, posteriormente utilizados das demais simulações.	46
Tabela 4.8 – Comparação entre as simulações das moagens com diferentes frações de enchimento.	52
Tabela 4.9 – Diâmetros médios das partículas após 5, 10 e 15 minutos de moagem, com 2, 4 e 6% de corpos moedores.	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 Importância da moagem e seu estudo na indústria do cimento	13
2.2 Fabricação de cimento	14
2.3 Moagem	16
2.3.1 Moinho de bolas	17
2.3.2 Variáveis que influenciam a moagem no moinho de bolas	18
2.3.3 Regime de escoamento das bolas no moinho.....	21
2.4 Método dos Elementos Discretos.....	23
2.4.1 Ângulos de <i>Shoulder</i> e <i>Toe</i>	23
2.4.2 Número de <i>Rayleigh</i>	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 Densidade	26
3.2 Porosidade	26
3.3 Diâmetro inicial das partículas.....	26
3.4 Experimentos	27
3.5 Peneiramento	30
3.6 Simulações utilizando o Método dos Elementos Discretos.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Diâmetro inicial das partículas.....	35
4.2 Experimentos e peneiramento parcial	36
4.2.1 Análise da influência da velocidade de rotação	36
4.2.1.1 Utilizando uma fração de corpos moedores de 2% do volume do tambor.....	36
4.2.1.2 Utilizando uma fração de corpos moedores de 4% do volume do tambor.....	38
4.2.1.3 Utilizando uma fração de corpos moedores de 6% do volume do tambor.....	40
4.3 Peneiramento total das partículas.....	42
4.4 Simulações	45
4.5 Análise do efeito das variáveis no diâmetro médio de <i>Sauter</i> final.....	46
4.6 Número e forças de colisões partícula-partícula e partícula-parede na simulação	50
5 CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

No processo de produção de cimento, a moagem está bastante presente em várias etapas, desde a diminuição da granulometria das matérias-primas, até a cominuição do clínquer, que é o produto da calcinação do calcário e da argila e que, após a adição de aditivos, dá origem ao cimento.

Na indústria de cimentos, o moinho de bolas é o tipo de moinho mais utilizado e consiste, basicamente, em um tambor, preenchido por corpos moedores, que gira horizontalmente em torno do próprio eixo.

A moagem no moinho de bolas é uma das operações, na indústria cimenteira, que exige maior investimento, haja vista o seu alto consumo de energia que representa de 30 a 70% da energia total consumida pela planta (GOMES, 2014 apud MACHADO, 2016). Por isso, faz-se necessário um estudo detalhado deste equipamento, para o correto entendimento de como as variáveis operacionais influenciam no processo de moagem, garantindo, assim, um projeto que permita lucro e produtos de maior qualidade.

Algumas variáveis operacionais necessitam, essencialmente, de análises, para que suas influências no processo de moagem sejam utilizadas a favor do processo. O movimento da carga moedora no interior do moinho de bolas, por exemplo, afeta significativamente a eficiência do processo de moagem através da ocorrência dos fenômenos de quebra. A diminuição do tamanho das partículas depende diretamente, também, das condições operacionais do moinho de bolas, como a velocidade de rotação e o nível de enchimento, da geometria do equipamento, dentre outros. Dependendo de como as variáveis operacionais estão combinadas, diferentes regimes de escoamento podem surgir no interior do moinho de bolas.

Atualmente, a maior parte dos projetos de moinhos é feita por meio de equações empíricas, cujo objetivo é analisar o comportamento das partículas no processo de moagem. Porém, com o avanço da tecnologia e com a crescente capacidade de processamento dos computadores, novas ferramentas estão disponíveis, que permitem a abordagem de modelos matemáticos para a compreensão de fenômenos físicos.

As simulações utilizando o Método dos Elementos Discretos (DEM – *Discrete Element Method*) vêm sendo bastante utilizadas no estudo do comportamento de partículas. Usando uma abordagem Lagrangeana, que acompanha a trajetória individual de cada partícula, as forças que atuam em cada uma delas são calculadas baseadas nas leis de interação partícula-partícula e partícula-parede. Através desse método, é possível, então, determinar a quantidade e a

intensidade de colisões envolvidas em cada passo de tempo no equipamento, auxiliando na compreensão dos resultados de moagem.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é estudar a eficiência de moagem de clínquer em um moinho de bolas, analisando a influência da quantidade de carga moedora, da velocidade de rotação e do tempo de moagem na distribuição granulométrica final das partículas, e comparar com os resultados do número e das forças de colisões obtidos através de simulação computacional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância da moagem e seu estudo na indústria do cimento

O processo de fabricação de cimento consiste, basicamente, na calcinação e na fusão de um material constituído de, aproximadamente, 94% (p/p) de calcário, 4% (p/p) de argilas e 2% (p/p) de óxidos de ferro e alumínio em um forno rotativo operando a temperaturas de 1450°C. Nesse forno, depois de as matérias-primas serem submetidas aos processos de moagem e dosagem, acontece uma série de reações, onde o material é sinterizado e parcialmente fundido, o que dará origem ao clínquer (ROCHA; LINS; SANTO, 2011; MARÍNGOLO, 2001; ANDRADE; CUNHA; SILVA, 2002).

Em seguida, o clínquer é resfriado e moído. Para que seja obtido o cimento propriamente dito, realiza-se uma dosagem com gesso e outras adições, como cinza pozzolânica, escórias de alto forno, filler calcário, dependendo do tipo de cimento que se quer produzir. (ANDRADE; CUNHA; SILVA, 2002; VARELA; VIEIRA, 2005).

Como visto, o cimento resulta da moagem fina de vários componentes, sendo o componente maioritário o clínquer. A produção de clínquer é a parte do processo de produção do cimento que mais consome energia, cerca de 63% de toda a energia gasta no processo. Nessa etapa importante, tem-se a presença constante da moagem. Sabe-se também que o tamanho das partículas exerce uma influência determinante nas propriedades e no comportamento dos materiais ao longo do processo de fabricação, o que está diretamente relacionado às características finais do produto (RIBEIRO; ABRANTES, 2001; SANTI, 1997).

Devido a isso, em vários países, o setor minero-metalúrgico vem analisando alternativas para diminuição dos custos das operações de processo, que vão desde a pesquisa de processos alternativos de fragmentação até a investigação de revestimentos especiais para moinhos, aumento de vida das faces dos britadores, pesquisa do consumo de bolas, planejamento de operações para otimizar os circuitos de moagem e classificação, além da crescente implantação de automação e instrumentação das plantas de cominuição da indústria mineral (CASSOLA; MORAES; ALBERTIN, 2004).

Por isso, dada a importância do clínquer e do processo de moagem ligado a ele, é necessário, para que uma otimização efetiva do processo seja atingida, em termos de menor custo operacional e maior lucro, além de melhor qualidade do produto final, primeiramente, um entendimento profundo das variáveis operacionais ligadas aos processos de moagem (DE CARVALHO; TAVARES, 2013; VARELA; VIEIRA, 2005).

2.2 Fabricação de cimento

A palavra cimento é derivada da palavra latina *caementum*. A história desse material data de muito tempo. Os romanos já utilizavam em suas obras de alvenaria, pontes e aquedutos uma mistura de cal e terra pozolana (cinzas vulcânicas das ilhas gregas de Santorim e da região de Pozzuoli), que resultava em uma massa aglomerante (GRANDE, 2003).

Em 1824, o pedreiro Joseph Aspdin patenteou a descoberta do cimento, dando o nome de cimento Portland, em homenagem a Portlandstone, um tipo de pedra arenosa muito usada em construções na região de Portland, Inglaterra (TAYLOR, 1967).

Os cimentos são substâncias ligantes capazes de unir fragmentos ou massas de materiais sólidos em um corpo compacto. A indústria de cimento está distribuída por quase todos os países do mundo em empresas tanto locais quanto internacionais (ANDRADE; CUNHA; SILVA, 2002; CENTURIONE, 1993).

O processo tecnológico de produção de cimento implantado na maioria das indústrias brasileiras pode ser resumido em algumas etapas, que são, basicamente: moagem e homogeneização das matérias-primas, para obtenção da farinha crua (94% da farinha constitui-se de calcário, 4% é argila e 2% é constituído de quantidades menores de óxidos de ferro e alumínio); clínquerização da farinha crua em fornos rotativos para obtenção do clínquer e resfriamento e moagem desse clínquer com posterior adição de gesso para obtenção do cimento; ensacamento e expedição do produto final (SANTI; SEVÁ FILHO, 2004).

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

Como já citado, a produção de cimento acontece em algumas etapas. O início desse processo se dá na mineração do calcário, feita com o auxílio de explosivos. Após a extração desse minério, ocorre uma redução primária em britadores. Em seguida, ocorre uma etapa de mistura e homogeneização da amostra que será utilizada como matéria-prima. Essa etapa é necessária, visto que o material de partida para a formação do clínquer deve conter em sua composição química, basicamente, cal (CaCO_3), sílica, alumina e óxido de ferro e, como esses componentes não são comumente encontrados juntos em uma única amostra, é necessário obter uma com a composição adequada (SANTI; SEVÁ FILHO, 2004; CENTURIONE, 1993).

Após essa etapa, pode ocorrer uma etapa de pré-homogeneização, que é facultativa, mas de grande importância para a homogeneização final da farinha (CENTURIONE, 1993).

O material, então, é conduzido a moinhos (normalmente, são utilizados moinhos de bolas), que reduzirão a farinha a granulometrias micrométricas. O material moído passa por um ou mais separadores, que discriminam o material grosseiro, o qual retorna ao moinho (CENTURIONE, 1993).

A queima é o processo que vem em seguida e pode depender de alguns fatores, como a disponibilidade de combustível, umidade das matérias-primas, entre outros. O processo pode acontecer via úmida, com a presença de água no forno, onde há melhor manuseio das matérias-primas, menor desgaste dos equipamentos e menor emissão de pó. Esse processo era muito utilizado, devido à simplicidade de instalação e operação dos fornos. Porém, a grande desvantagem associada é o elevado consumo de energia (SHREVE; BRINK JR, 1980). Devido a isso, os sistemas de fornos via seca são os mais usuais na indústria cimenteira, visto que propiciam maior eficiência energética, economia de combustível e menor emissão de poluentes (ABCP, 2012 apud CAMPOS, 2017).

A queima da farinha pode ser dividida nos seguintes estágios: pré-aquecimento, calcinação, clinquerização e resfriamento. O pré-aquecimento consiste no reaproveitamento dos gases provenientes do forno para aquecimento da farinha de 50 a 800°C. Nessa etapa, ocorre a perda de água livre dos minerais da farinha, a desidroxilação dos argilominerais e o início da decarbonatação do calcário (CENTURIONE, 1993).

A calcinação é o processo responsável por promover, rapidamente, a decarbonatação do CaCO_3 . O calcinador funciona como um forno, gerando gás em uma faixa de temperatura entre 850 e 1000°C (MARÍNGOLO, 2001).

O restante da calcinação da farinha, assim como o aquecimento final e o processo de clinquerização acontecem no forno rotativo (MARÍNGOLO, 2001). O processo que ocorre no forno, a 1450°C, consiste em, basicamente, fusão e formação de clínquer no formato de pelotas (JOHANSEN, 1989 apud MONTINI, 2009).

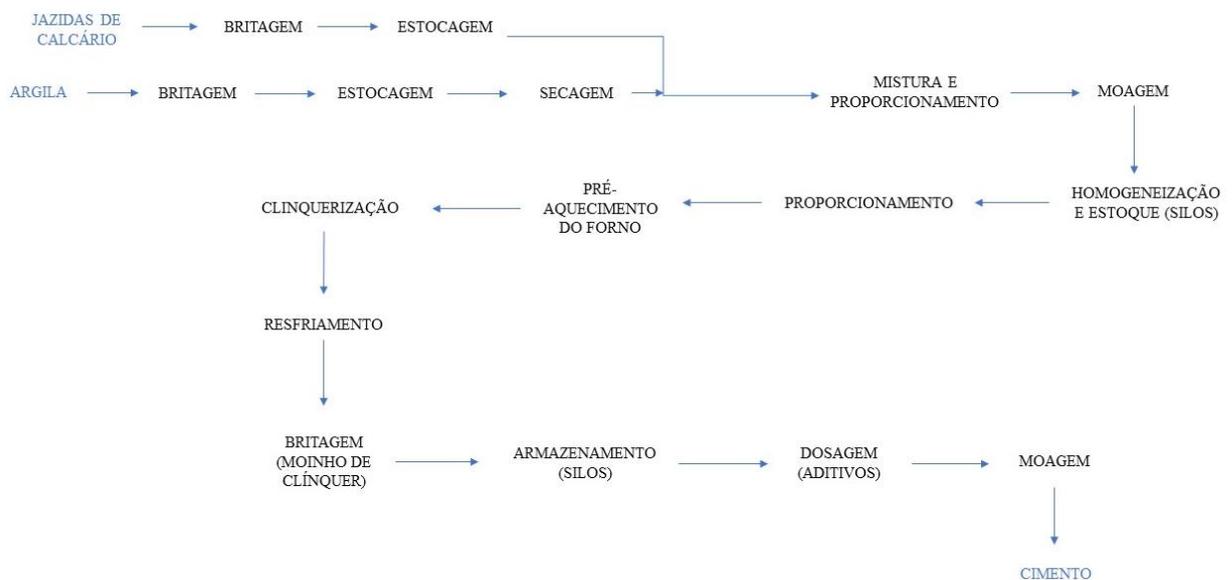
Logo após as reações acontecerem, inicia-se o resfriamento do forno, que consiste na redução da temperatura de queima. O objetivo é reduzir o mais rápido possível a temperatura do material que sai do forno, visando estabilizar as fases mineralógicas formadas durante a clinquerização (CENTURIONE, 1993).

A reação de clinquerização se completa no estágio de resfriamento, quando ocorre uma série de reações químicas que influenciarão a resistência mecânica do concreto nas primeiras idades, o calor de hidratação, o início de pega e a estabilidade química dos compostos (CAMPOS, 2017).

Após a devida queima da farinha, o clínquer produzido passa, novamente, por um processo de moagem final, onde se adiciona, principalmente, o gesso, material que auxiliará na regulagem do tempo de secagem do concreto.

A Figura 2.1 representa um fluxograma que esquematiza todo o processo de fabricação do cimento, citado anteriormente:

Figura 2.1 - Fluxograma geral do processo de fabricação do cimento.



Fonte: Adaptado de Shreve; Brink Jr. (1980).

2.3 Moagem

O objetivo de qualquer processo de moagem é a diminuição do tamanho das partículas de um material sólido, que ocorre através dos mecanismos de abrasão e impacto (RIBEIRO; ABRANTES, 2001; MACHADO, 2016).

O atrito do material com o próprio, com a carga moedora e com as paredes do equipamento corresponde ao mecanismo denominado abrasão. A força é insuficiente para gerar fratura em toda a partícula, porém ocorre 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).

O mecanismo de fratura das partículas considerado mais eficiente é o de impacto. Nesse mecanismo, a força é inserida de forma rápida e com intensidade muito superior à resistência

da partícula. O impacto gera grande quantidade de partículas de tamanho inferior se comparado à partícula original (MACHADO, 2016; RIBEIRO, 2004; FOGGIATTO, 2009).

Algumas características da matéria-prima influenciam no rendimento da moagem, tais como: dimensão e forma inicial das partículas, dureza do material (resistência à compressão, ao choque e à abrasão), estrutura homogênea ou heterogênea, umidade ou higroscopicidade, sensibilidade à variação da temperatura, tendência à aglomeração, entre outras (RIBEIRO; ABRANTES, 2001).

O processo de moagem pode acontecer a seco ou a úmido. O processo a seco apresenta menor desgaste do moinho e dos corpos moedores. Já no processo a úmido, há um maior consumo de energia (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

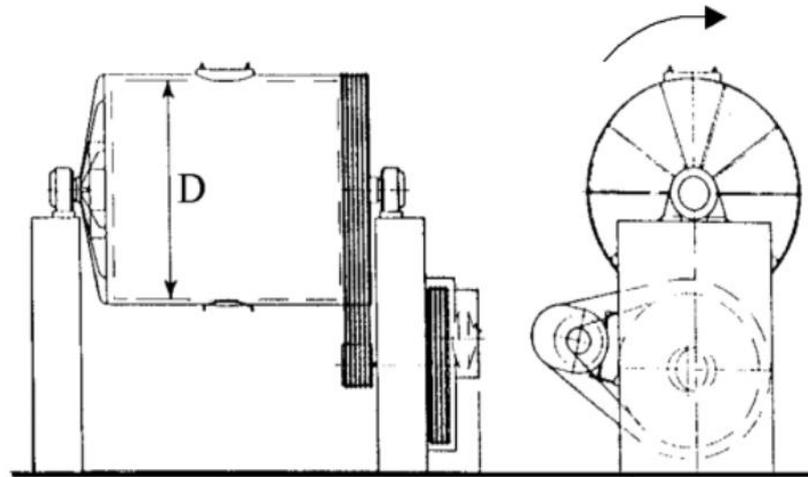
Dentre os tipos mais comuns de moinhos, podem-se citar: moinho de bolas, moinho de barras, moinho tubular e o moinho de compartimentos. Além desses, existe a moagem de alta energia, que consiste em um processo importante na obtenção de materiais nano-particulados (CASTRO, 2018).

2.3.1 Moinho de bolas

O moinho de bolas é o tipo de moinho mais utilizado em circuitos industriais de moagem, normalmente empregado para moagem de materiais finos e em um único estágio. São habitualmente aplicados no processamento de grandes volumes de materiais, como na indústria do cimento (MACHADO, 2016; RIBEIRO; ABRANTES, 2001).

O moinho de bolas consiste, basicamente, em um tambor que gira em torno do próprio eixo e que é preenchido por corpos moedores. A Figura 2.2 esquematiza uma visão geral e lateral de um moinho de bolas. Os corpos moedores devem ser grandes, duros e pesados em relação ao minério, mas pequenos, em relação ao volume do moinho e, preferencialmente, devem possuir formato esférico. O interior do moinho de bolas é forrado com um material duro ou com borracha e, nele, rolam os corpos moedores em conjunto com o material a ser moído (RIBEIRO; ABRANTES, 2001).

Figura 2.2 – Representação de um moinho de bolas em uma visão geral e outra, lateral.



Fonte: Ribeiro; Abrantes (2001).

Durante o processo de moagem, o impacto e o atrito entre os corpos moedores e entre estes e as paredes internas do moinho sobre a amostra promovem a cominuição das partículas, fazendo-as reduzir seu tamanho (NANDI; MONTEDO, 2009).

Para que a dimensão do material seja reduzida pelo processo de moagem no moinho de bolas, deve haver dois tipos de regimes: de cascadeamento, que consiste na quebra por abrasão; e de catarateamento, que favorece a quebra por impacto (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

O moinho de bolas apresenta alto grau de eficiência e confiabilidade, porém, grande parte da energia cinética despendida para o processo de moagem é perdida na forma de ruídos, calor e outras perdas, como a movimentação dos corpos moedores, que consome grande parte dessa energia (MACHADO, 2016).

2.3.2 Variáveis que influenciam a moagem no moinho de bolas

No processo de produção de cimento, a moagem é uma das operações que exige maior investimento e estudo, haja visto o seu alto consumo de energia. Isso acontece porque, na fabricação do cimento, como já citado, a moagem está bastante presente em várias etapas, como na diminuição da granulometria das matérias-primas e do clínquer.

O correto dimensionamento do tambor do moinho de bolas, uma proporção favorável de carga moedora e material a ser moído, bem como uma velocidade de rotação adequada, contribuem para uma maior eficiência de moagem.

Com relação à velocidade adequada, a velocidade de rotação dos moinhos de bolas é calculada em função da velocidade angular crítica (V_{AC}), que consiste na velocidade em que as componentes das forças centrífuga e do peso do material se igualam, anulando a ação de moagem (RIBEIRO; ABRANTES, 2001). Os moinhos de bolas operam a uma velocidade entre 60 e 85% da velocidade angular crítica (BERALDO, 1987 apud MACHADO, 2016).

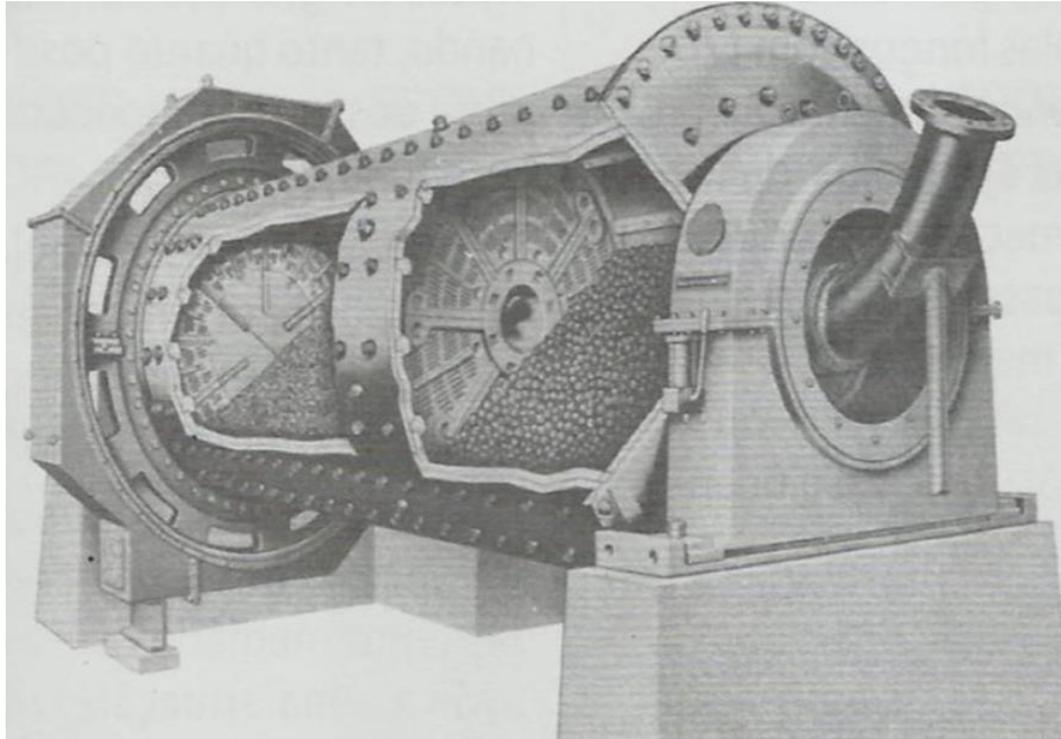
A velocidade angular crítica, onde ocorre a centrifugação completa, é dada pela expressão:

$$V_{AC} = \frac{42,3}{D^{1/2}} \quad (2.1)$$

em que D é o diâmetro do moinho (m) e V_{AC} é dada em m/s (FOGGIATO, 2009)

O tamanho dos corpos moedores também é um fator importante na operação de moagem. Corpos moedores de tamanho maior, possuem maior energia de colisão e, devido a isso, garantem uma maior moagem. Porém, a certa granulometria, as bolas não conseguem mais se chocar com as partículas. Em contrapartida, quanto menor o tamanho das bolas, mais colisões ocorrem entre as partículas e os corpos moedores, porém as forças são de menor intensidade. Devido a todos esses fatores, durante uma moagem efetiva, o ideal seria fazer a utilização de bolas de tamanhos diferentes na operação. Ademais, como as bolas menores possuem baixa energia cinética e maior número de contatos, o tamanho ideal dos corpos moedores diminui com o aumento da velocidade do tambor, garantindo maior contato bola-material (NAPIER-MUNN et al., 1996 apud RODRIGUEZ, 2016; SHIN et al., 2013; YOVANOVIC, 2006). A Figura 2.3 mostra como os moinhos são subdivididos nas indústrias. As partículas são transportadas por câmaras, onde acontece a diminuição do tamanho das bolas ao longo do tambor rotativo do moinho.

Figura 2.3 – Subdivisões dentro dos moinhos de bolas.



Fonte: Metso (2015) apud Machado (2016).

A proporção entre carga moedora e material a ser moído também deve ser avaliada. O material a ser moído deve encher, ou exceder ligeiramente, o espaço vazio entre as bolas. No entanto, essa ocupação de volume não é efetiva, dado os espaços vazios entre as bolas. Para que isso seja considerado, faz-se uso de um cálculo para encontrar a quantidade adequada de bolas a serem utilizadas no moinho (RIBEIRO; ABRANTES, 2001):

$$P = V \cdot d_B \cdot p \cdot 0,60 \quad (2.2)$$

em que P representa a quantidade de bolas (Kg), d_B é a massa específica das bolas (Kg/L), V corresponde ao volume útil do moinho (L) e p é a taxa de ocupação aparente das bolas (0,50 a 0,55).

O nível de enchimento do moinho por corpos moedores também afeta diretamente a eficiência do processo de moagem, pois está ligado ao consumo energético e à ocorrência de eventos de quebra em quantidade suficiente no processo de cominuição. Para que haja sucesso no processo, a porcentagem de bolas não deve ultrapassar 50% do volume do moinho (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

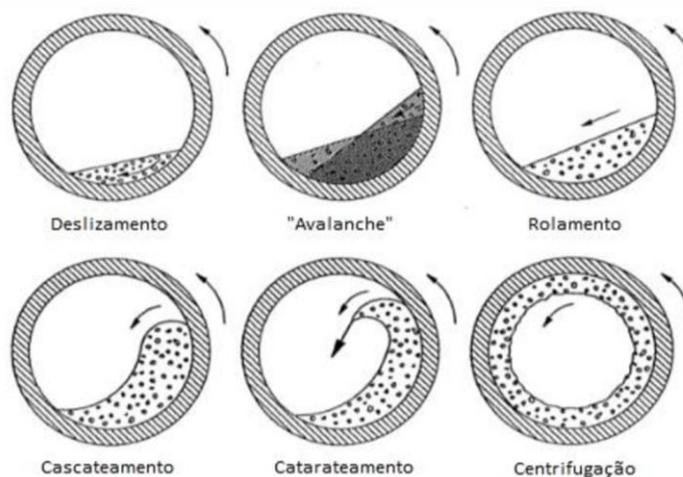
2.3.3 Regime de escoamento das bolas no moinho

Compreender o comportamento dos corpos moedores no interior do moinho oferece condições para melhorias da operação, resultando em diminuição de gastos energéticos, redução dos desgastes da carga moedora e do revestimento do moinho, entre outros benefícios (LIMA, 2018).

Dependendo de algumas características geométricas e operacionais, tais como, velocidade de rotação, fração de preenchimento, diâmetro do tambor e propriedades do material particulado, os corpos moedores de um moinho de bolas podem apresentar diferentes regimes de escoamento em seu interior: deslizamento, “avalanche”, rolamento, cascadeamento, catarateamento e centrifugação (Figura 2.3) (FERREIRA; SCATENA; DUARTE, 2014).

Os regimes de “avalanche”, rolamento e cascadeamento, são os regimes de escoamento mais utilizados em processos industriais, como por exemplo, granulação, mistura, secagem e recobrimento. O regime de catarateamento é, principalmente, empregado nos processos de moagem. Por outro lado, os regimes de deslizamento e centrifugação não são utilizados em nenhum processo industrial e devem ser evitados (MELLMANN, 2001).

Figura 2.4 – Regimes de escoamento dos corpos moedores.



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

O regime de deslizamento é caracterizado por um leito estático de material que desliza sobre a parede do cilindro que está em movimento. A combinação de baixas velocidades com baixos coeficientes de atrito entre as partículas do leito e a parede do cilindro contribui para a

ocorrência desse regime, que é indesejável em processos industriais, já que causa pouco ou nenhum grau de mistura (SHERRITT et al., 2003).

No regime de “avalanche” ou caimento, 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. Nesse regime, um certo grau de mistura é alcançado em virtude das constantes avalanches que ocorrem no leito de material após atingir um ângulo de repouso crítico (FERREIRA; SCATENA; DUARTE, 2014; HEMA, 2003).

À medida que a velocidade de rotação do tambor aumenta, ocorre a transição para o regime de rolamento. O período entre uma “avalanche” e outra se torna pequeno e isso acarreta na formação de apenas uma fina camada de partículas sobre a superfície do leito, que é plana e tem inclinação constante, caracterizando o ângulo de repouso dinâmico do material. O movimento de rolamento é bastante almejado em processos industriais que necessitam de um elevado grau de mistura do leito de partículas. (MACHADO, 2016; FERREIRA; SCATENA; DUARTE, 2014).

A superfície do leito, então, começa a se arquear, apresentando formato de feijão, com um maior aumento da velocidade de rotação, correspondendo ao regime de cascadeamento. A trajetória circular desenvolvida pelas paredes do tambor carrega as partículas até que elas alcancem certa altura e, depois, rolem umas sobre as outras no leito da carga. No regime de cascadeamento no interior de um moinho, quase não há impacto entre bolas e partículas e a fragmentação ocorre, basicamente, por atrito e abrasão (MELLMANN, 2001; FERREIRA; SCATENA; DUARTE, 2014; FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

Em altas velocidades de rotação, o regime de catarateamento é observado. Nele, as partículas começam a ser lançadas do leito de material para o espaço vazio do tambor, caindo diretamente sobre o leito de carga. Esse regime privilegia a quebra por impacto (MELLMANN, 2001; FERREIRA; SCATENA; DUARTE, 2014; FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004).

No regime de catarateamento, é importante conhecer a trajetória da carga de bolas no interior do moinho, de modo a priorizar a queda das partículas sobre o leito de carga, e não sobre o revestimento do moinho, para evitar desgaste das bolas, devido ao impacto com a parede (MACHADO, 2016).

A centrifugação é alcançada quando as partículas na órbita mais externa do cilindro atingem o ponto vertical mais alto e não caem em catarata. Nesse momento, a força centrífuga

e a força gravitacional que estão agindo sobre a partícula entram em equilíbrio (WATANABE, 1999).

2.4 Método dos Elementos Discretos

As simulações realizadas para o estudo da moagem neste trabalho utilizam o Método dos Elementos Discretos. 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. Esse método 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).

O DEM utiliza a abordagem Lagrangeana, onde as informações das propriedades das partículas são tratadas a nível microscópico. As forças que atuam em cada partícula são calculadas baseadas nas leis de interação partícula-partícula. Assim, o esforço computacional é diretamente proporcional ao número de partículas do sistema, restringindo o uso desse método em larga escala, visto que isso exige uma capacidade de processamento muito grande (NASCIMENTO, 2014).

O Método dos Elementos Discretos é uma abordagem bastante utilizada para a análise da dinâmica dos corpos moedores em moinhos de bolas. Esse método é capaz de fornecer informações a respeito do consumo de energia da operação, do desgaste do revestimento e das esferas e sobre as regiões da carga onde são observados os maiores índices de moagem (MACHADO, 2016).

Esse método aplica a segunda Lei de Newton para calcular a velocidade, momento e posição de cada partícula em cada instante de tempo. Faz-se o uso do modelo de Hertz-Mindlin, que consiste em uma lei de deslocamento, utilizada 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).

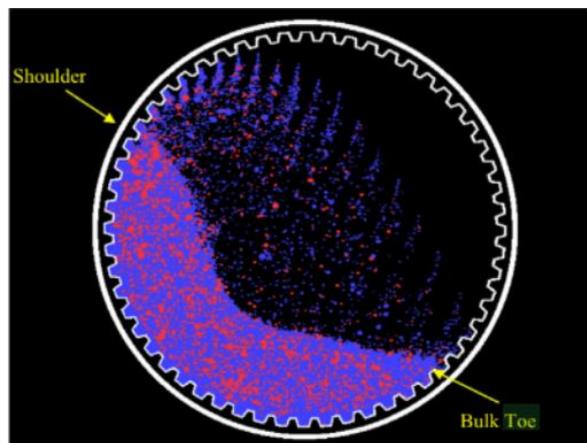
2.4.1 Ângulos de *Shoulder* e *Toe*

Para a calibração das simulações, geralmente é necessário que se encontre os ângulos de *shoulder* e *toe* (Figura 2.4). Uma característica relevante dos regimes de cascadeamento e

catarreamento é a localização dos pontos de *shoulder* e *toe*, que são pontos que indicam a posição onde a carga começa e termina seu movimento em queda livre ou rolando sobre a superfície. Esses pontos são úteis, pois podem ser usados para descrever a orientação da carga (POWELL; MCBRIDE, 2004).

O ponto de *shoulder* é a posição vertical mais alta que a carga pode atingir até ser lançada em voo livre. O ponto de *toe* corresponde à posição mais baixa de contato da carga com a parede do moinho (POWELL; MCBRIDE, 2004).

Figura 2.5 – Demonstração dos ângulos *shoulder* e *toe* em uma simulação, onde os corpos moedores estão apresentados em vermelho e o minério, em azul.



Fonte: Owen; Cleary (2015).

2.4.2 Número de *Rayleigh*

Nas simulações DEM, a escolha de um passo no tempo adequado é de grande importância.

Em um grupo de partículas, a transmissão de força entre as mesmas ocorre através da 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 em uma simulação DEM deve ser inferior ao necessário para que a onda de Rayleigh percorra a partícula de menor tamanho (NASCIMENTO, 2018; DANBY; SHRIMPTON; PALMER, 2013).

As Equações 2.3 e 2.4 apresentam a velocidade de onda de Rayleigh e o intervalo de tempo crítico de integração (LI et al., 2016).

$$v_R = (0,1613 \cdot v_p + 0,8766) \sqrt{\frac{G}{\rho_s}} \quad (2.3)$$

$$t_R = \frac{\pi \cdot r^2 \sqrt{\frac{\rho_S}{G}}}{(0,1613 \cdot \nu_p + 0,8766)} \quad (2.4)$$

em que r é o raio da menor partícula no sistema, ρ_S é a densidade da partícula, G é o módulo de cisalhamento e ν_p representa a razão de Poisson.

Na simulação, foi utilizado um passo de tempo que corresponde a 20% do passo de tempo crítico, estipulado pela Equação 2.4. Esse limite de 20% não deve ser excedido, de acordo com a literatura (LIMA, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Densidade do clínquer

O clínquer utilizado no presente trabalho foi cedido pela InterCement, indústria cimenteira, localizada na cidade de Ijaci-MG.

Para a determinação da densidade do clínquer, uma amostra foi pesada em um béquer (91,17 g) e inserida em um volume de água pré-definido em uma proveta. Foi avaliado, então, o deslocamento de volume da massa de clínquer, através do qual foi possível determinar a densidade. A densidade medida do clínquer foi de 3039 kg/m^3 .

A densidade do corpo moedor era conhecida, com um valor de 7890 kg/m^3 (MACHADO, 2016).

3.2 Porosidade do leito

Para se encontrar o valor de porosidade do clínquer, foi adicionado um volume pré-determinado (aproximadamente 180 mL) de clínquer a uma proveta e, em seguida, esse volume foi coberto com determinada quantidade de água, cujo volume também foi lido. Esse procedimento foi repetido quatro vezes, para minimizar o efeito da amostra na medida. Assim, o valor médio de porosidade encontrado foi $\varepsilon = 0,5570$.

Já se conhecia a porosidade do corpo moedor, cujo valor era 0,368 (MACHADO, 2016).

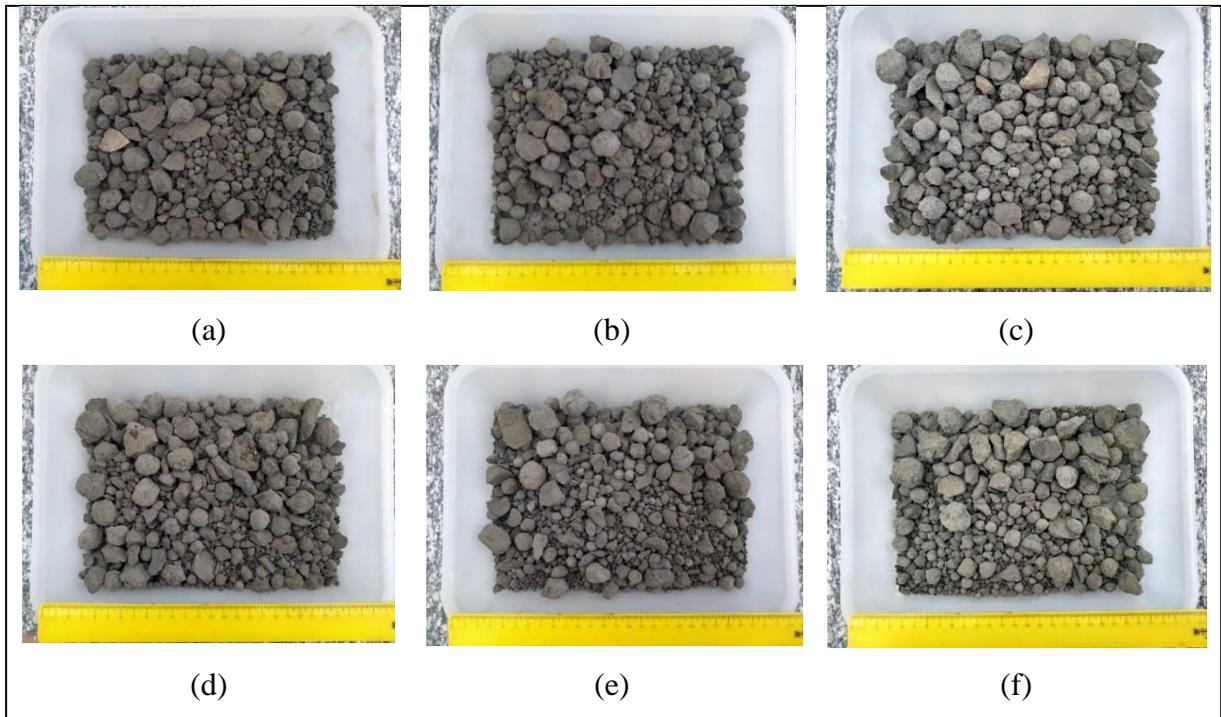
3.3 Diâmetro inicial das partículas

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

Foram capturadas imagens dessas amostras (Figuras 3.1(a)-(f)), que foram levadas ao programa Image J, para medição dos diâmetros. 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 das imagens foram medidos e colocados em ordem crescente e, posteriormente, foi construído um gráfico para determinação da faixa de diâmetros da maioria das partículas.

Esse método foi utilizado devido a indisponibilidade de peneiras com malha grossa o suficiente para fazer a classificação granulométrica das partículas através do peneiramento.

Figura 3.1 - Amostras iniciais de clínquer.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

3.4 Experimentos

Os experimentos de moagem foram realizados no Laboratório de Processos de Separações Mecânicas (LPSM), localizado na Universidade Federal de Lavras. Foi utilizado um moinho de bolas, com tambor rotativo de 40 cm de comprimento e 27,5 cm de diâmetro, mostrado na Figura 3.2. Com essas dimensões, foi possível calcular o volume do tambor, que resultou em aproximadamente $23,8 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$. Os corpos moedores utilizados foram esferas de aço-cromo de 25 mm de diâmetro, cedidos pela Universidade Federal de Uberlândia.

As moagens foram realizadas mantendo-se, sempre, uma fração de 5% do volume do tambor preenchida com o clínquer a ser moído. Essa fração, depois de calculados e convertidos os valores, representa cerca de 1,6 kg de material.

Os parâmetros variados durante os experimentos foram a frequência de rotação, cujos valores variaram entre 20, 40 e 60 Hz (velocidades de rotação correspondentes à 15, 31 e 47 rpm), a fração de enchimento dos corpos moedores, com valores de 2, 4 e 6% do volume do

tambor (aproximadamente 2,37, 4,74 e 7,11 kg, respectivamente), e os tempos de moagem, variando entre 5, 10 e 15 minutos.

Embora a literatura aconselhe a realização da moagem com uma quantidade de bolas em torno de 50% da capacidade líquida do tambor, não foi possível realizar os experimentos nessas condições, visto que porcentagens maiores que 6% foram testadas anteriormente e o peso excessivo dentro do tambor causou comprometimento das velocidades de rotação.

Cada moagem foi realizada por 15 minutos, com paradas de 5 em 5 minutos.

Figura 3.2 - Módulo de moagem utilizado para a realização dos experimentos no LPSM.



Fonte: imagem capturada pela autora.

A frequência de rotação e a fração de enchimento dos corpos moedores variaram segundo uma ordem pré-estabelecida pelo Planejamento Fatorial 3^k , com $k=3$, que consiste em uma ferramenta para determinação da realização de experimentos com parâmetros envolvidos. As especificações dos experimentos estão representadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Especificações dos 27 experimentos de moagem realizados.

Experimento	Frequência de rotação (Hz)	Fração de enchimento dos corpos moedores (%)	Tempo de moagem (minutos)
1	20	2	5
2	20	2	10
3	20	2	15
4	60	2	5
5	60	2	10
6	60	2	15
7	20	6	5
8	20	6	10
9	20	6	15
10	60	6	5
11	60	6	10
12	60	6	15
13	40	4	5
14	40	4	10
15	40	4	15
16	20	4	5
17	20	4	10
18	20	4	15
19	40	2	5
20	40	2	10
21	40	2	15
22	40	6	5
23	40	6	10
24	40	6	15
25	60	4	5
26	60	4	10
27	60	4	15

Fonte: Da autora.

3.5 Peneiramento

O processo de moagem foi interrompido a cada cinco minutos para que 100 gramas da amostra fossem retirados. Assim, utilizando peneiras de *mesh*'s 10, 12, 16, 20, 32 e 42, e com o auxílio do agitador eletromagnético, foi feito o peneiramento para posterior caracterização granulométrica.

As amostras de todos os experimentos, em sua totalidade de massa, também foram peneiradas, utilizando-se as mesmas peneiras, durante 10 minutos, para que todos os diâmetros fossem englobados no cálculo.

O cálculo dos diâmetros foi feito com base no diâmetro médio de *Sauter*. Sendo x_i a fração retida e D_i , o diâmetro médio entre a fração mássica passante e a retida, tem-se que (CREMASCO, 2014):

$$dp_s = \frac{1}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{D_i}\right)} \quad (3.1)$$

3.6 Simulações utilizando o Método dos Elementos Discretos

Para simular o comportamento dos corpos moedores dentro do moinho de bolas, primeiramente, construiu-se a malha computacional deste equipamento utilizando-se o *software* GMSH. As dimensões do tambor foram exatamente as mesmas do trabalho experimental.

Para realizar a simulação, foram necessários alguns parâmetros para se fazer a calibração, como coeficiente de atrito estático, coeficiente de atrito de rolamento e coeficiente de restituição. A calibração é uma etapa bastante importante, visto que influencia a qualidade e a coerência dos resultados das simulações (FOGGIATO, 2009).

O coeficiente de atrito estático determina quanto torque é necessário aplicar a um objeto em repouso para produzir seu movimento. A força de atrito estático máxima é igual à força mínima necessária para iniciar o movimento de um corpo. O coeficiente de atrito de rolamento é a relação entre o torque necessário para o corpo se manter a uma velocidade constante e o produto do peso do sólido e o raio de curvatura. Quanto mais próximo esse coeficiente é de 1, mais força é necessária para o corpo se manter em movimento a uma mesma velocidade. Já o coeficiente de restituição está diretamente relacionado à energia dissipada durante uma colisão e é definido como a razão da velocidade antes e após do impacto do objeto (RODRIGUEZ, 2016).

As faixas estimadas desses coeficientes foram retiradas da literatura (OWEN; CLEARY, 2015) e são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores de coeficiente de atrito estático, coeficiente de atrito de rolamento e coeficiente de restituição para o aço.

Coeficientes	mín	máx	média
At. Estático	0,4	0,7	0,55
At. Rolamento	0,01	0,05	0,03
Restituição	0,3	0,7	0,5

Fonte: Owen; Cleary (2015).

Para a definição dos parâmetros utilizados nas simulações, foi aplicado o Planejamento Composto Central. Com esse planejamento foi possível construir a Tabela 3.3 com as variáveis codificadas e reais dos coeficientes de atrito, rolamento e restituição, para 16 simulações de moagem. O valor de α para ortogonalidade, apresentado na Tabela 3.3 como 1,28719, permite analisar efeitos de cada variável separadamente.

Com a Tabela 3.3, foi possível realizar as 16 simulações a 20 Hz e 4% do volume do tambor preenchido com corpos moedores. Em todas elas, foram geradas imagens que foram analisadas, para encontrar os pontos de *shoulder* e *toe*.

Esses pontos também foram definidos nas imagens geradas do experimento de moagem realizado às mesmas condições das simulações de calibração. Assim, através da comparação entre esses pontos nas simulações e no experimento, definiu-se a simulação que fornecia o melhor resultado para os parâmetros, através da análise dos ângulos de *shoulder* e *toe* que foram semelhantes nas duas situações. Sendo assim, simulações posteriores utilizaram os parâmetros da simulação de calibração que obteve maior sucesso, a partir dessa análise.

Tabela 3.3 – Valores dos coeficientes codificados e reais para as 16 simulações realizadas.

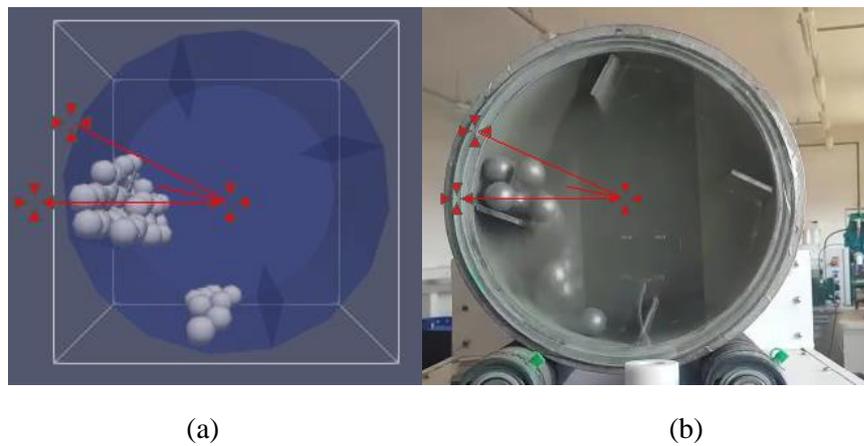
n°	Codificadas			Reais		
	Atrito estático	Atrito de rolamento	Restituição	Atrito estático	Atrito de rolamento	Restituição
1	-1,00000	-1,00000	-1,00000	0,4	0,01	0,3
2	-1,00000	-1,00000	1,00000	0,4	0,01	0,7
3	-1,00000	1,00000	-1,00000	0,4	0,05	0,3
4	-1,00000	1,00000	1,00000	0,4	0,05	0,7
5	1,00000	-1,00000	-1,00000	0,7	0,01	0,3
6	1,00000	-1,00000	1,00000	0,7	0,01	0,7
7	1,00000	1,00000	-1,00000	0,7	0,05	0,3
8	1,00000	1,00000	1,00000	0,7	0,05	0,7
9	-1,28719	0,00000	0,00000	0,356921724	0,03	0,5
10	1,28719	0,00000	0,00000	0,743078276	0,03	0,5
11	0,00000	-1,28719	0,00000	0,55	0,00425623	0,5
12	0,00000	1,28719	0,00000	0,55	0,05574377	0,5
13	0,00000	0,00000	-1,28719	0,55	0,03	0,2425623
14	0,00000	0,00000	1,28719	0,55	0,03	0,7574377
15	0,00000	0,00000	0,00000	0,55	0,03	0,5
16	0,00000	0,00000	0,00000	0,55	0,03	0,5

Fonte: Da autora.

As Figuras 3.3 (a) e (b) representam como foram obtidos os ângulos de *shoulder* para a calibração das simulações. A Figura 3.3 (a) mostra esse ângulo para a simulação 7, em determinado instante, e a Figura 3.3 (b), para o experimento de calibração, às mesmas condições das 16 simulações.

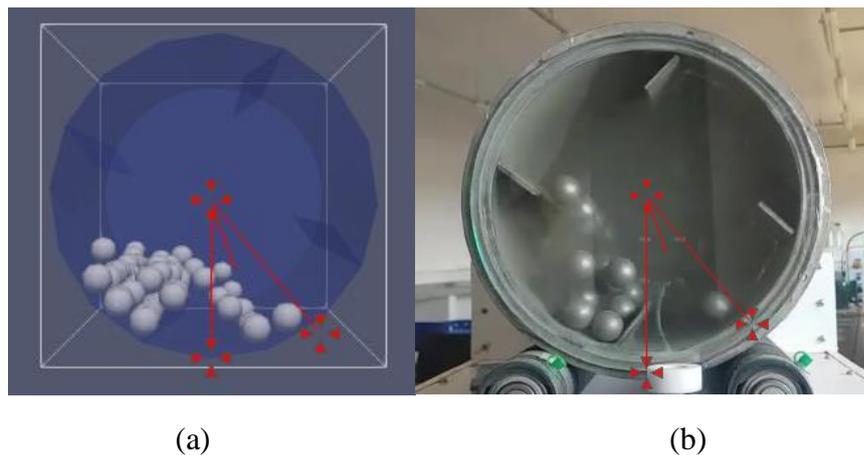
As Figuras 3.4 (a) e (b) representam, respectivamente, os ângulos de *toe* para a simulação 7, em determinado instante, e para o experimento de calibração, realizado às mesmas condições das 16 simulações.

Figura 3.3 – Obtenção do ângulo *shoulder* para a simulação (a) e para o ensaio experimental (b).



Fonte: Da autora.

Figura 3.4 - Obtenção dos ângulos de *toe* para a simulação (a) e para o ensaio experimental (b).



Fonte: Da autora.

Nas simulações dos experimentos, o passo de tempo foi calculado com base no número de *Rayleigh* (Equação 2.3) que, por sua vez, está relacionado aos números de *Poisson* e módulo de *Young* para o aço (LIMA, 2017), apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Números de módulos de *Young*, razão de *Poisson* e força de cisalhamento, necessários para o código das simulações dos experimentos.

Razão de Poisson (-)	Módulo de Young (Pa)	Força de Cisalhamento (Pa)
0,2	$5 \cdot 10^6$	$3,57 \cdot 10^6$

Fonte: Lima (2017).

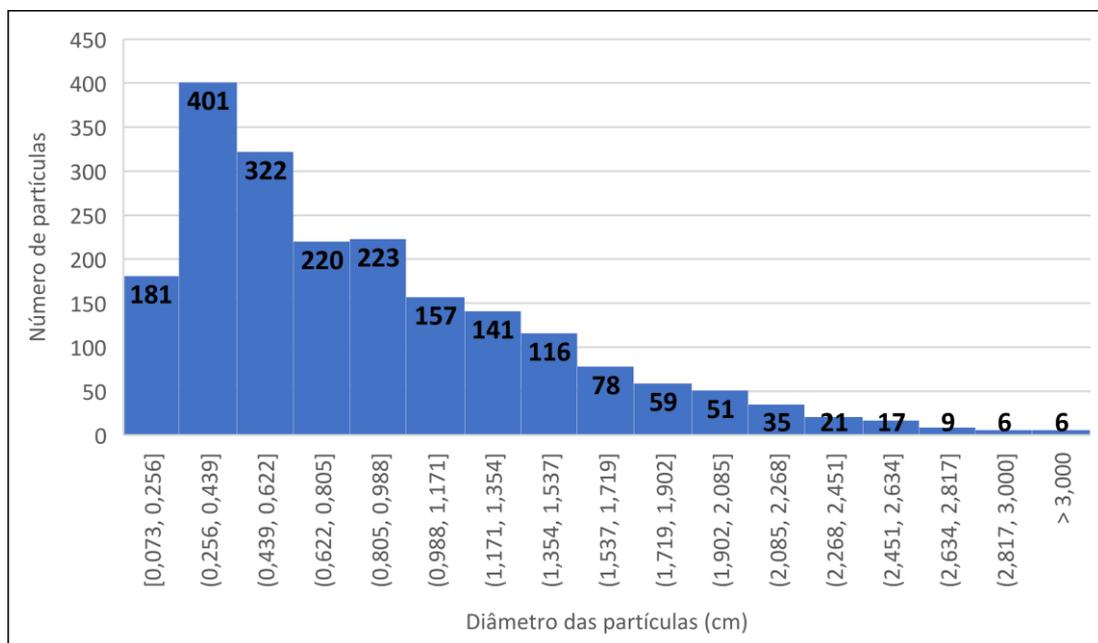
O *software* LIGGGHTS foi utilizado para implementar o código das simulações, baseando-se no modelo de contato de Hertz-Mindlin. Os resultados das simulações foram analisados visualmente através do *software* PARAVIEW.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diâmetro inicial das partículas

Logo após as seis amostras iniciais passarem por medição de diâmetro, os valores encontrados foram organizados em ordem crescente para cada amostra, para caracterização do diâmetro inicial das partículas. A Figura 4.1 apresenta esses valores:

Figura 4.1 – Distribuição dos diâmetros encontrados para as 6 amostras iniciais, pelo programa Image J.



Fonte: Da autora.

Pode-se notar que 28,5% das partículas apresentam diâmetro inicial entre 0,073 e 0,439 cm. Por outro lado, 71,5% das partículas, a maioria delas, apresenta diâmetro inicial entre 0,439 cm e diâmetros maiores que 3 cm, indicando que o valor exato do diâmetro no início da moagem encontra-se, provavelmente, entre essa faixa de valores.

Fazendo-se uma média ponderada dos valores dos diâmetros e de suas respectivas quantidades nas amostras analisadas, tem-se que o diâmetro médio inicial das partículas é 0,87 cm.

4.2 Peneiramento parcial

Os peneiramentos de todos os experimentos foram feitos com paradas de 5 em 5 minutos, até um total de 15 minutos. A cada parada, fotos das 100 gramas das amostras peneiradas foram capturadas.

4.2.1 Análise da influência da velocidade de rotação

4.2.1.1 Utilizando uma fração de corpos moedores de 2% do volume do tambor

Após os tempos de 5, 10 e 15 minutos de moagem, amostras de 100 gramas, para o tambor operando com uma fração de 2% de corpos moedores e velocidades de rotação de 15, 31 e 47 rpm, foram peneiradas. A sequência dos resultados é mostrada nas Figuras 4.2 - 4.4.

Figura 4.2 - Moagem com 2% de corpos moedores a 15 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Figura 4.3 - Moagem com 2% de corpos moedores a 31 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Figura 4.4 - Moagem com 2% de corpos moedores a 47 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Pode-se perceber, pelas Figuras de 4.2, 4.3 e 4.4 que, no geral, a granulometria das partículas apresentou redução ao longo do tempo de moagem. Nos experimentos a 15 (Figura 4.2) e a 47 rpm (Figura 4.4), é possível notar que, de 5 para 15 minutos de moagem, houve um aumento das partículas mais finas, indicando sucesso de moagem, quando se analisa somente a capacidade de redução do tamanho das partículas pelas imagens.

Isso pode ser comprovado também quando se analisa os resultados dos diâmetros médios de *Sauter* encontrados para esses experimentos, com base na Equação 3.1, a partir dos peneiramentos feitos. Observa-se, pela Tabela 4.1, que o diâmetro médio das partículas depois da moagem a 5 minutos apresenta valor maior do que os diâmetros médios encontrados para 10 e 15 minutos de moagem. Especialmente nos experimentos a 15 e a 47 rpm, como já notado visualmente, a diferença entre o primeiro e os dois últimos diâmetros é grande, indicando que a maior diminuição dos diâmetros aconteceu logo com 10 minutos de operação.

No entanto, os valores dos diâmetros pouco diferiram entre os tempos de 10 e 15 minutos de moagem, principalmente naquela que ocorreu a 15 rpm. Nota-se, também, que o experimento a 47 rpm foi o que apresentou maior diferença (com valor de 0,2871 mm) entre os diâmetros nos tempos inicial e final.

Com relação à eficiência de moagem no geral, pode-se perceber que, à velocidade de 31 rpm, a diferença entre o diâmetro inicial das partículas (8,7 mm) e o final (0,2918 mm), depois de 15 minutos de moagem, é a maior, indicando que essa velocidade contribuiu para uma boa cominuição das partículas.

É importante notar que, logo nos primeiros momentos de moagem, o processo já se mostrou efetivo, visto que o diâmetro inicial encontrado para as partículas foi de 0,87 cm e os diâmetros calculados em 5 minutos de moagem já se apresentaram em valores bem abaixo do inicial (valores com média de 0,5263 mm).

Tabela 4.1 – Diâmetro médio das partículas calculados pela Equação 3.1 após 5, 10 e 15 minutos de moagem, a diferentes velocidades para 2% de carga moedora.

2%			
Velocidade (rpm)	Diâmetro (mm) 5 min	Diâmetro (mm) 10 min	Diâmetro (mm) 15 min
15	0,5520	0,3689	0,3543
31	0,4438	0,3453	0,2918
47	0,5832	0,3347	0,2961

Fonte: Da autora.

4.2.1.2 Utilizando uma fração de corpos moedores de 4% do volume do tambor

A seguir, são mostrados os resultados de peneiramento das amostras de 100 gramas coletadas e peneiradas após 5, 10 e 15 minutos de moagem para o tambor operando com uma fração de corpos moedores correspondente a 4% do volume total, nas três velocidades de rotação: 15, 31 e 47 rpm.

Pelas imagens, observa-se que, para a velocidade de 47 rpm (Figura 4.7), o aumento da quantidade de partículas finas ao longo do tempo é muito maior do que para as velocidades de rotação de 15 (Figura 4.5) e 31 rpm (Figura 4.6).

Figura 4.5 - Moagem com 4% de corpos moedores a 15 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.



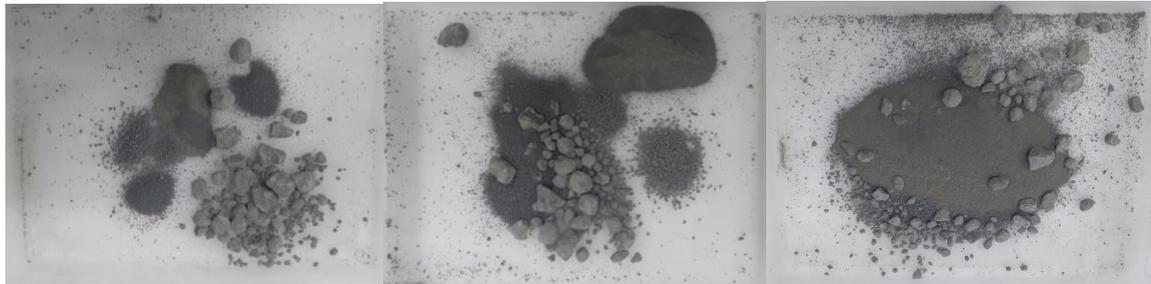
Fonte: imagens capturadas pela autora.

Figura 4.6 - Moagem com 4% de corpos moedores a 31 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Figura 4.7 - Moagem com 4% de corpos moedores a 47 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Os diâmetros médios de *Sauter* foram, então, determinados para cada etapa dos experimentos e estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Diâmetro médio das partículas calculado pela Equação 3.1, após 5, 10 e 15 minutos de moagem, a diferentes velocidades para 4% de carga moedora.

4%			
Velocidade (rpm)	Diâmetro (mm) 5 min	Diâmetro (mm) 10 min	Diâmetro (mm) 15 min
15	0,2418	0,2063	0,1939
31	0,2631	0,2378	0,2226
47	0,2663	0,2507	0,2175

Fonte: Da autora.

Analisando a Tabela 4.2, é possível perceber que os experimentos não apresentaram grande variação dos diâmetros ao longo do tempo. Mesmo com menores diferenças de valores

de diâmetro ao longo do tempo, os experimentos a 15 e a 47 rpm foram os que mostraram maior distinção entre o início e o final do processo de cominuição.

Se for feita a comparação com o diâmetro inicial das partículas, assim como nos experimentos a 2% de corpos moedores, pode-se dizer que, a moagem nestas condições também levou a uma diminuição considerável das granulometrias nos primeiros cinco minutos de operação, visto que o diâmetro das partículas caiu de um valor de 0,87 cm para valores em torno de 0,25 mm. Isso indica que, quando se leva em conta a moagem ao longo do tempo, a maior parte das partículas é moída nos cinco primeiros minutos e, a partir desse momento, a moagem passa a ser menos eficiente.

Esse fato observado experimentalmente, nas frações de enchimento de 2 e 4%, explica o porquê de, na indústria, as melhores condições serem alcançadas quando há a diminuição do tamanho das bolas ao longo do equipamento, mantendo-se a eficiência do moinho ao longo de todo o seu comprimento. Até determinado ponto, a moagem se mostra eficiente, porém, quando se atinge um certo valor de diâmetro das partículas, esse processo fica constante, sendo necessária a troca das bolas, para que a granulometria continue a ser reduzida ao longo da operação.

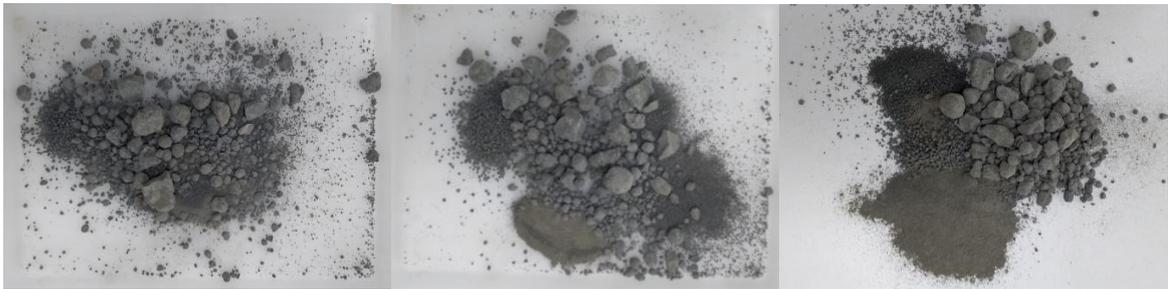
A velocidade que mais se adequou ao processo de moagem a 4% em volume de corpos moedores foi a de 15 rpm, visto que foi maior a diferença (8,5061 mm) entre o diâmetro final após 15 minutos de moagem e o diâmetro inicial das partículas.

4.2.1.3 Utilizando uma fração de corpos moedores de 6% do volume do tambor

Assim como para frações de enchimento de 2 e 4%, foi feita uma análise granulométrica das partículas de clínquer para o tambor operando com uma fração de sólidos equivalente a 6% do volume do tambor. As Figuras 4.8 - 4.10 mostram as imagens das amostras de 100 gramas coletadas e peneiradas após 5, 10 e 15 minutos de moagem para essa condição.

Analisando-se as figuras (Figuras 4.8 - 4.10), observa-se, para todas as velocidades, um aumento visual considerável de partículas mais finas ao longo do tempo de moagem, apesar de serem mantidas várias partículas de granulometria maiores.

Figura 4.8 - Moagem com 6% de corpos moedores a 15 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Figura 4.9 - Moagem com 6% de corpos moedores a 31 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Figura 4.10 - Moagem com 6% de corpos moedores a 47 rpm após 5, 10 e 15 minutos de peneiramento, respectivamente.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Foi medido, então, o diâmetro médio de *Sauter* para cada condição de moagem e os resultados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Diâmetro médio das partículas calculados pela Equação 3.1, após 5, 10 e 15 minutos de moagem, a diferentes velocidades.

6%			
Velocidade (rpm)	Diâmetro (mm) 5 min	Diâmetro (mm) 10 min	Diâmetro (mm) 15 min
15	0,4646	0,3893	0,2904
31	0,3348	0,2162	0,2018
47	0,5578	0,2726	0,2499

Fonte: Da autora.

Pela Tabela 4.3, pode-se notar que, o experimento a 31 rpm apresentou o menor diâmetro final das partículas e maior diferença (8,4982 mm) entre esse valor e o diâmetro inicial, indicando que, a essa velocidade, a moagem contribuiu mais para a redução dos tamanhos das partículas. Observa-se que, para 15 e 47 rpm, a diminuição dos diâmetros acontece em todos os 15 minutos de operação do equipamento.

4.3 Peneiramento total das partículas

A amostra inicial do clínquer a ser moído é apresentada na Figura 4.11, que ilustra o clínquer inicial, antes de passar pelo processo de moagem no moinho de bolas.

Figura 4.11 - Amostra inicial de clínquer.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Para as análises dos experimentos, foram realizados peneiramentos de apenas 100 gramas do material moído. No entanto, desconfiando-se de um possível efeito da amostragem

nos resultados, realizou-se o peneiramento das amostras em seus pesos totais, cujas imagens estão representadas nas Figuras 4.12 - 4.14.

Figura 4.12 - Amostra final da moagem com 2% de corpos moedores a 15, 31 e 47 rpm, respectivamente.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Figura 4.13 - Amostra final da moagem com 4% de corpos moedores a 15, 31 e 47 rpm, respectivamente.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Figura 4.14 - Amostra final da moagem com 6% de corpos moedores a 15, 31 e 47 rpm, respectivamente.



Fonte: imagens capturadas pela autora.

Percebe-se, pela análise da amostra inicial (Figura 4.11), em comparação com as amostras finais dos experimentos (Figuras 4.12, 4.13, e 4.14), que, após as moagens, todas as amostras apresentaram granulometria menor, notando-se, visualmente, um aumento de partículas mais finas. Na amostra inicial, claramente, as partículas possuem diâmetro maior.

As amostras finais, em sua totalidade de massa, também passaram por um processo de peneiramento, para determinação do diâmetro médio de *Sauter*, segundo a Equação 3.1. As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os diâmetros encontrados pelo peneiramento total e os diâmetros encontrados com o peneiramento de 100 gramas das amostras após 15 minutos de moagem.

Tabela 4.4 – Comparação entre os diâmetros calculados para o peneiramento do total da amostra moída e para o peneiramento de 100 gramas das amostras nos experimentos com 2% de corpos moedores, ambos após 15 minutos de moagem.

2%		
Velocidade (rpm)	Diâmetro (mm) total	Diâmetro (mm) amostra
15	0,3411	0,3543
31	0,2846	0,2918
47	0,3035	0,2961

Fonte: Da autora.

Tabela 4.5 – Comparação entre os diâmetros calculados para o peneiramento do total da amostra moída e para o peneiramento de 100 gramas das amostras nos experimentos com 4% de corpos moedores, ambos após 15 minutos de moagem.

4%		
Velocidade (rpm)	Diâmetro (mm) total	Diâmetro (mm) amostra
15	0,2186	0,1938
31	0,2329	0,2226
47	0,2279	0,2175

Fonte: Da autora.

Tabela 4.6 – Comparação entre os diâmetros calculados para o peneiramento do total da amostra moída e para o peneiramento de 100 gramas das amostras nos experimentos com 6% de corpos moedores, ambos após 15 minutos de moagem.

6%		
Velocidade (rpm)	Diâmetro (mm) total	Diâmetro (mm) amostra
15	0,2867	0,2904
31	0,2108	0,2018
47	0,2095	0,2499

Fonte: Da autora.

Pode-se perceber, pela comparação dos diâmetros encontrados para as amostras de 100 gramas peneiradas por 15 minutos e para as amostras peneiradas com o peso total, que os valores se aproximaram significativamente.

Somente para o experimento com 6% de corpos moedores a 47 rpm, o diâmetro para a amostra de 100 gramas foi de 0,2499 mm e para a amostra total foi 0,2095 mm, com uma diferença percentual em relação à amostra total de 19,28%, sendo a maior diferença encontrada para todos os experimentos. Essas diferenças, ainda que pequenas, comprovam que, para essa velocidade de rotação, provavelmente, as amostras de 100 gramas não permitiram uma caracterização fiel do material, ou seja, nem todos os diâmetros presentes na amostra total foram englobados no peneiramento.

Apesar dessas diferenças, pode-se afirmar que, as amostras de 100 gramas foram suficientes para caracterizar a amostra total de clínquer.

4.4 Simulações

Para que as simulações com as mesmas condições dos experimentos fossem realizadas, foi necessário definir alguns valores, como coeficiente de restituição e coeficientes de atrito estático e de rolamento. Com base em análises dos ângulos de *shoulder* e *toe* através de imagens do experimento de calibração e das simulações (que foram definidas pelo método do Planejamento Composto Central, utilizando os valores da literatura para os coeficientes em questão, de acordo com a Tabela 3.3), foi possível concluir que a simulação que obteve maior aproximação dos ângulos analisados para o caso simulado e para o caso experimental foi a 7.

De posse dessas informações, os valores de coeficiente de restituição, coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito de rolamento para a simulação 7, que estão apresentados

na Tabela 4.7, foram utilizados nas simulações seguintes, possibilitando uma aproximação satisfatória das condições experimentais.

Tabela 4.7 – Valores dos coeficientes da simulação 7, posteriormente utilizados nas demais simulações.

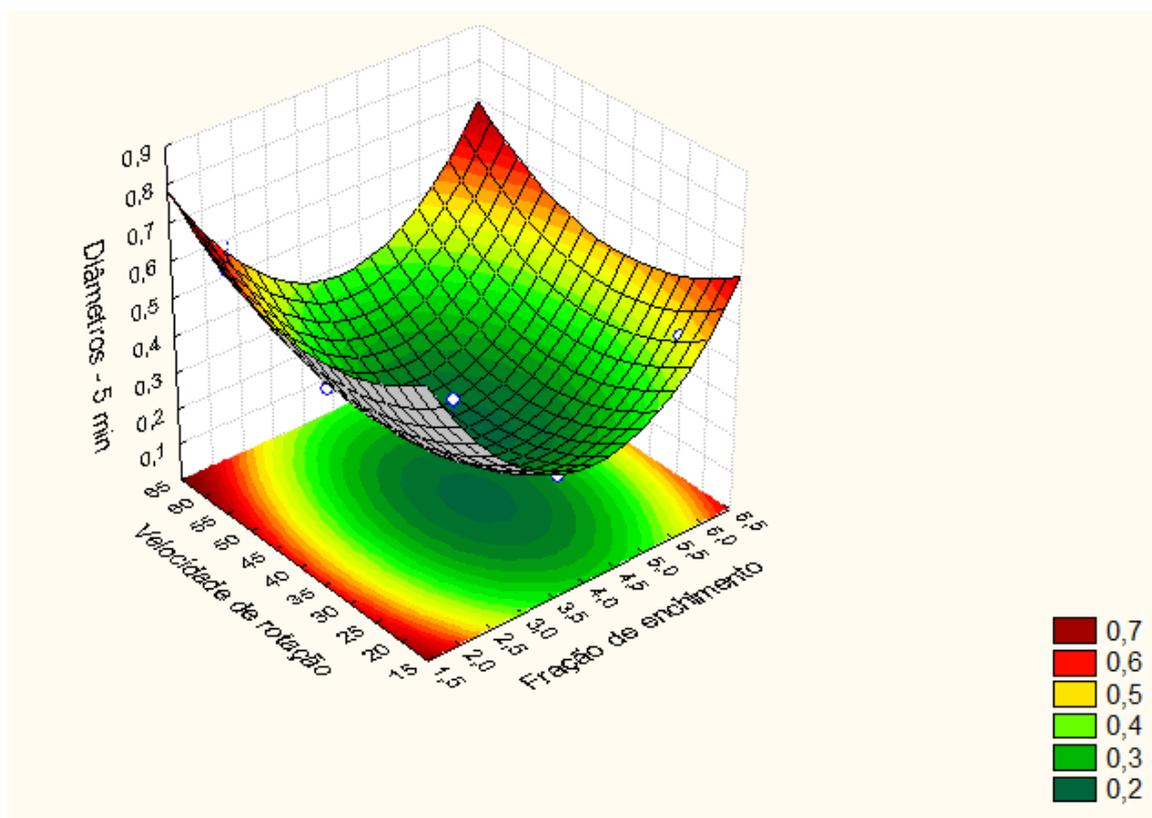
Coef. de restituição	Coef. atrito estático	Coef. atrito rolamento
0,7	0,05	0,3

Fonte: Da autora.

4.5 Análise do efeito das variáveis no diâmetro médio de *Sauter* final

Com a finalidade de se analisar o efeito da quantidade de corpos moedores e da velocidade de rotação no diâmetro médio de *Sauter* final, realizou-se um ajuste dessas variáveis utilizando a técnica de superfície de respostas.

Figura 4.15 – Superfície de resposta para os diâmetros encontrados pelo peneiramento de 100 gramas das amostras, após 5 minutos de moagem, em relação à velocidade de moagem e fração de enchimento.

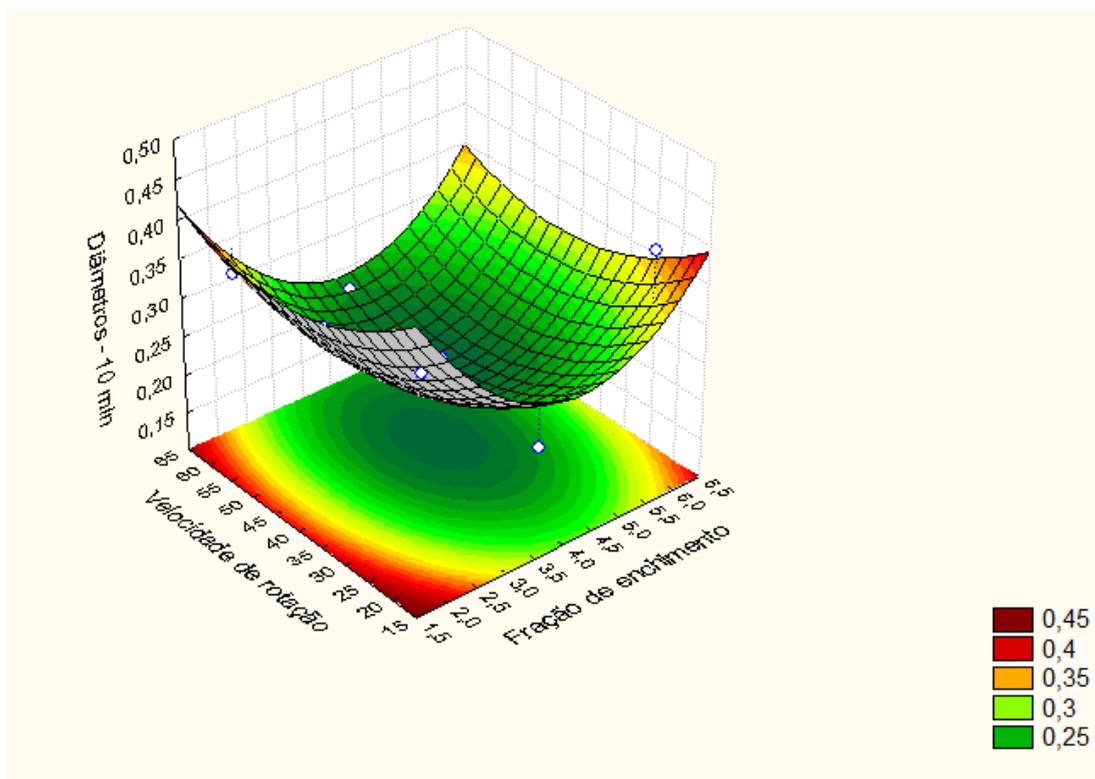


Fonte: Da autora.

É importante destacar na análise desses gráficos que a cor verde representa os menores diâmetros e as outras cores, os maiores, sendo a cor vinho a representação dos maiores diâmetros dentre todos.

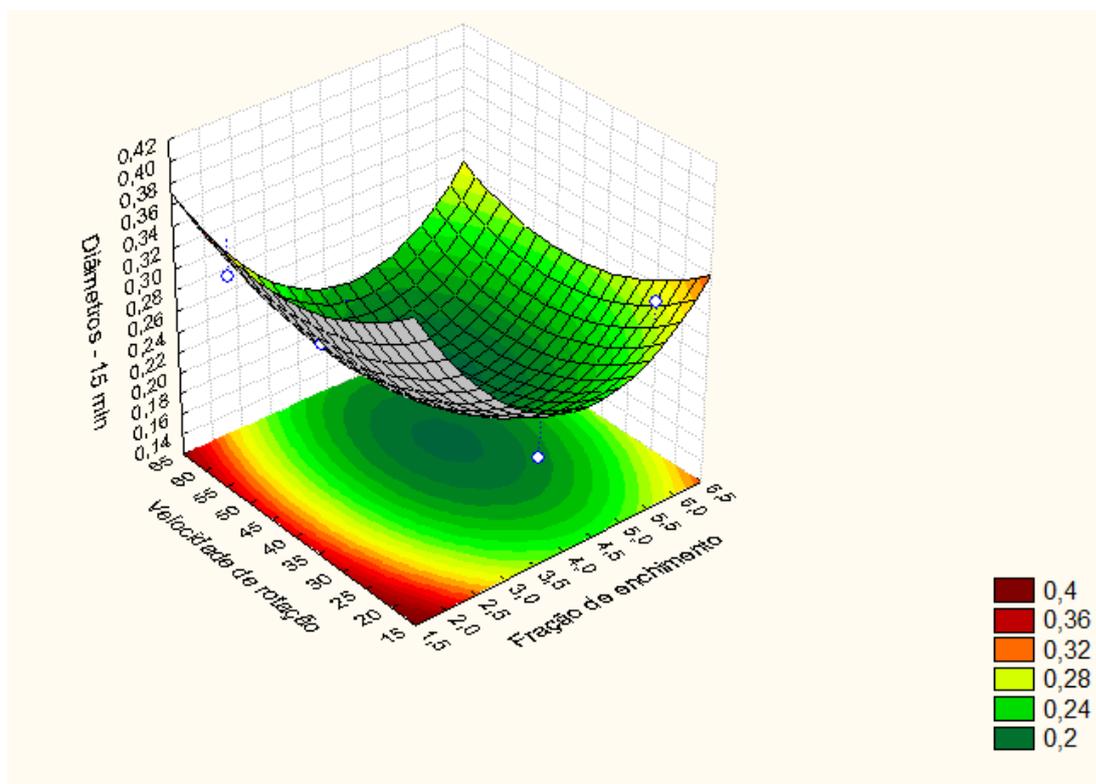
O coeficiente de determinação (R^2) para o ajuste de 5 minutos foi de 0,9107. Realizou-se, então, as análises para 10 e 15 minutos de moagem. Os resultados são apresentados respectivamente nas Figuras 4.16 ($R^2=0,6706$) e 4.17 ($R^2=0,8139$). Todas as superfícies de resposta foram geradas em um intervalo de confiança de 95%.

Figura 4.16 – Superfície de resposta para os diâmetros encontrados pelo peneiramento de 100 gramas das amostras, após 10 minutos de moagem, em relação à velocidade de moagem e fração de enchimento.



Fonte: Da autora.

Figura 4.17 – Superfície de resposta para os diâmetros encontrados pelo peneiramento de 100 gramas das amostras, após 15 minutos de moagem, em relação à velocidade de moagem e fração de enchimento.



Fonte: Da autora.

Através das Figuras 4.15 - 4.17, percebe-se que, os menores diâmetros foram alcançados tanto em velocidades quanto em frações de enchimento intermediárias.

O *software* STATISTICA utiliza um modelo quadrático em suas análises. Basicamente, sua função é ajustar as variáveis dadas nesse modelo e o coeficiente de determinação (R^2) indica o quanto as variáveis se adequaram ao modelo do *software*.

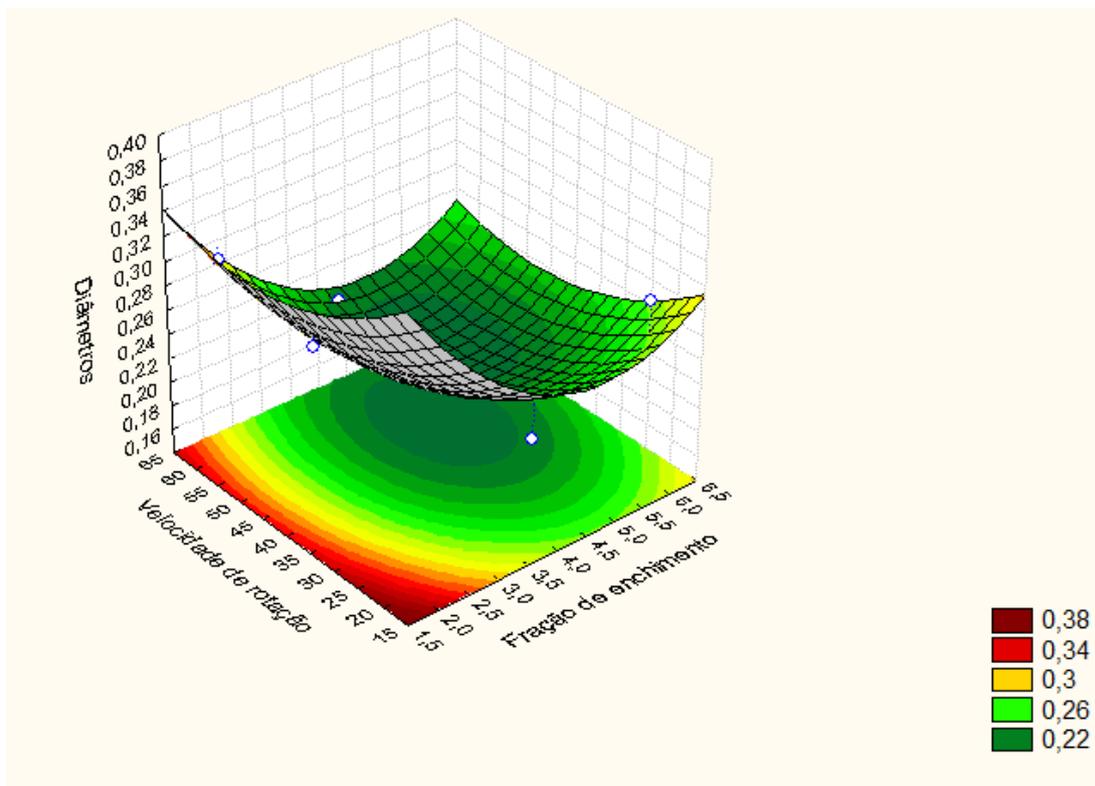
Dentre todos os tempos de moagem, aquele que apresentou maior valor de R^2 foi o de 5 minutos, apresentando um valor bem próximo de 1, o que é normalmente desejado. Isso indica que as variáveis para o processo de moagem a 5 minutos apresentaram melhor ajuste. Quanto mais próximo de 1 é o valor de R^2 , mais adequadas estão as variáveis dentro do modelo quadrático proposto e os diâmetros encontrados na situação onde houver maior coeficiente de determinação são valores que, provavelmente, mais correspondem à realidade das amostras.

Como observado, os experimentos a 2 e a 6% em volume de corpos moedores apresentaram moagem mais satisfatória a uma velocidade de 31 rpm. Já o experimento a 4% em volume de carga moedora, teve como melhor velocidade de moagem, 15 rpm. Pela Figura 4.17, percebe-se que os menores diâmetros foram alcançados em velocidades e frações de

enchimento intermediárias. Então, generalizando, pode-se dizer que uma condição satisfatória de moagem, de acordo com a superfície de resposta de 15 minutos, seria um experimento com fração de enchimento de 4% e velocidade de 31 rpm. Como o experimento a 4% de carga moedora apresentou 15 rpm como melhor velocidade para diminuição da granulometria das partículas, atribui-se essa diferença entre o ajuste e o experimental ao fato de que o valor de R^2 de 0,8139 não é tão próximo de 1, o que indica que o ajuste pode não corresponder à realidade prática.

Foi realizado o ajuste, então, dos diâmetros médios de *Sauter* das amostras totais e o resultado é mostrado na Figura 4.18.

Figura 4.18 - Superfície de resposta para os diâmetros encontrados, após o peneiramento total das amostras, em relação à velocidade de moagem e fração de enchimento.



Fonte: Da autora.

O valor de R^2 para esse caso foi de 0,8425. Assim como para a amostra de 100 gramas, para a amostra total, os resultados mostraram que tanto a velocidade de rotação quanto a fração de enchimento das partículas alteram o diâmetro final das partículas, sendo a moagem mais efetiva em velocidades de rotação e frações de enchimento mais altas.

Com o intuito de analisar esses resultados, foram feitas simulações da dinâmica das partículas usando o Método dos Elementos Discretos. Ao utilizar o método, analisou-se a

dinâmica das partículas e contabilizou-se o número e a força de colisões entre os corpos moedores envolvidos em cada condição de operação do equipamento.

4.6 Número e forças de colisões partícula-partícula e partícula-parede na simulação

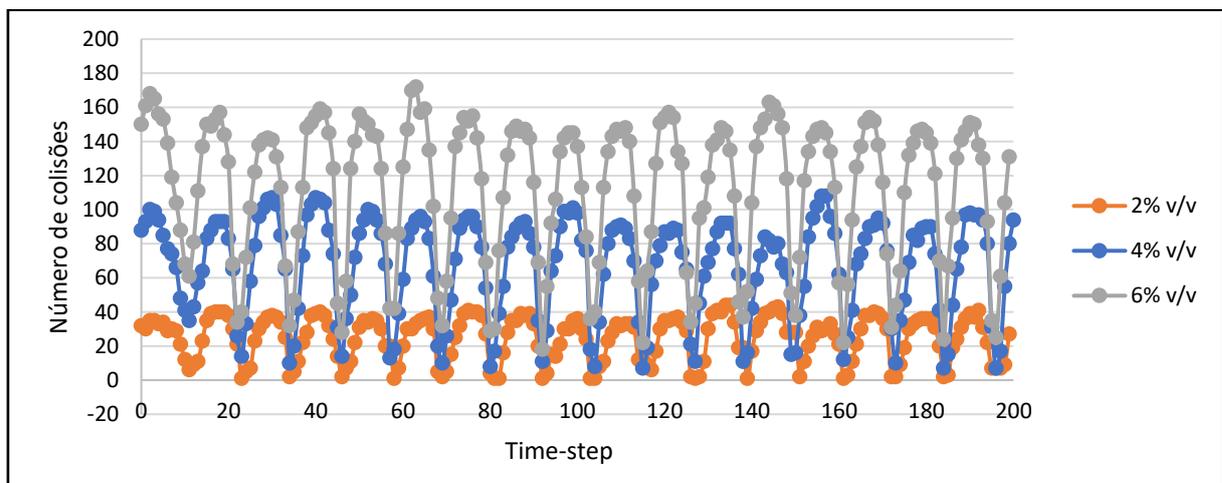
Determinar o regime de escoamento a partir da simulação é extremamente importante para a compreensão da dinâmica das partículas, uma vez que, assim, é possível determinar parâmetros difíceis de serem medidos experimentalmente, como a quantidade e intensidade das colisões.

A simulação da quebra das partículas é um fenômeno complexo e foge do escopo desse trabalho, por isso foram simulados apenas o movimento dos corpos moedores. Assim, foi possível relacionar a influência da dinâmica das partículas no resultado final de moagem.

Foram, então, gerados gráficos que representam o número de colisões e a força das mesmas, tanto na interação partícula-partícula, quanto na interação partícula-parede para o tambor operando em uma velocidade de 15 rpm. Somente a velocidade de 15 rpm foi considerada, pois o intuito era analisar a influência da fração de carga moedora no diâmetro das partículas, e não, o efeito da velocidade.

A Figura 4.19 apresenta o número de colisões partícula-partícula em cada passo de tempo de simulação (foram considerados um total de 200 passos no tempo) na velocidade de 15 rpm com o tambor operando com 2, 4 e 6% de corpos moedores em volume.

Figura 4.19 - Número de colisões partícula-partícula a 15 rpm.



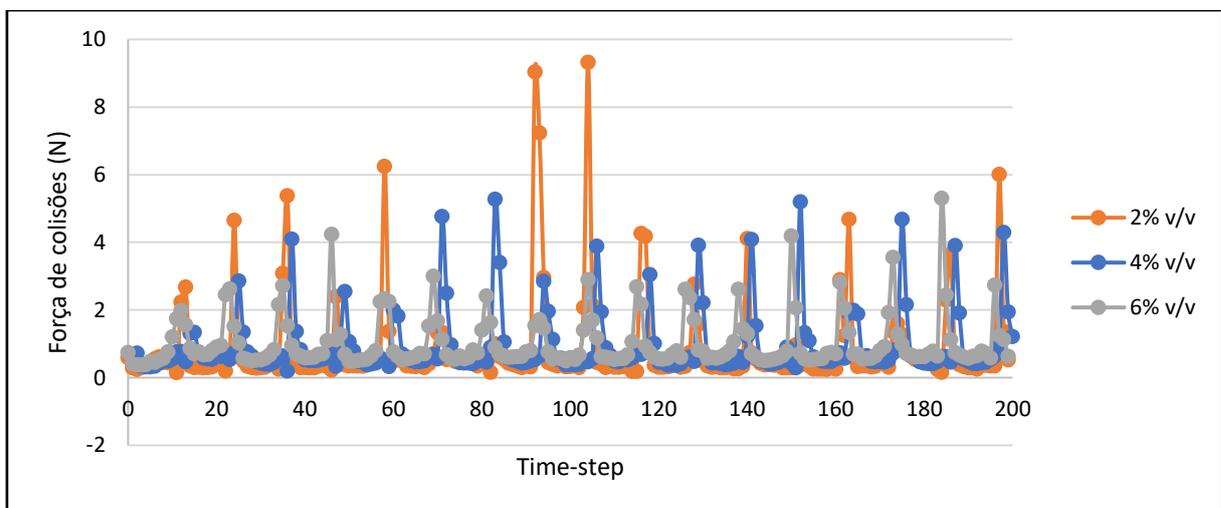
Fonte: Da autora.

Analisando a Figura 4.19, observa-se um comportamento cíclico dentro do moinho, em que cada ciclo corresponde a uma volta completa do tambor. Como todas as simulações foram realizadas na mesma velocidade de rotação, os ciclos possuem a mesma amplitude. O ponto mais alto do ciclo seria representado pela queda da maior parte das partículas do suspensor. Isso ocorre, pois, devido à necessidade de se utilizar um número menor de partículas, o leito nunca estava completamente preenchido.

Ainda na Figura 4.19, pode-se notar que, à medida que a fração de bolas dentro do moinho aumenta, o número de colisões também aumenta. Este era um resultado esperado visto que, quanto mais bolas dentro do tambor, maior a probabilidade de elas se chocarem entre si durante o movimento.

Analisou-se, então, quais eram as intensidades dessas colisões em (N), mostradas na Figura 4.20, e observou-se novamente um comportamento cíclico, com a presença de picos. Os picos, assim como no gráfico de número de colisões, representam o momento em que a maior parte das partículas cai do suspensor em direção àquelas que estão no fundo do leito.

Figura 4.20 - Força de colisões partícula-partícula a 15 rpm.

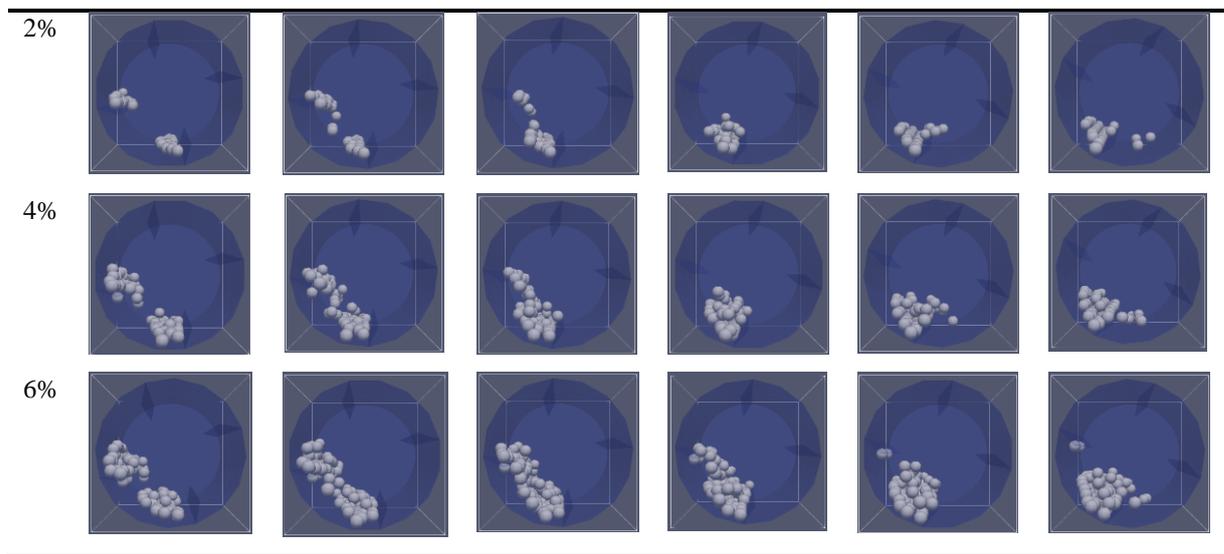


Fonte: Da autora.

Ainda observando a Figura 4.20, observa-se que, na média, as forças de colisão entre as partículas são maiores para o tambor operando com 4% do volume preenchido por corpos moedores do que para 2 e 6%. O fato de a fração de enchimento de 4% apresentar forças de colisão maiores pode ser comparado aos resultados para a superfície de resposta a 15 minutos de moagem, que também indicou que os menores diâmetros das partículas foram alcançados em frações de enchimento intermediárias.

Para investigar a razão de o tambor operando a 4% do volume preenchido por corpos moedores apresentar forças de colisão maiores do que para 2 e 6%, esboçou-se a dinâmica das partículas no moinho. A representação gráfica das três simulações é mostrada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Comparação entre as simulações das moagens com diferentes frações de enchimento.



Fonte: Da autora.

Analisando, então, a Tabela 4.8, nota-se que, para 2 e 4% de fração de enchimento, as esferas tendem a cair umas sobre as outras, de um ponto mais alto até um mais baixo, caracterizando a força de colisão maior nesses casos. Já para a simulação com 6%, as esferas apresentam um comportamento diferente, visto que não há uma queda de um ponto mais alto até um ponto mais baixo, e sim, um rolamento entre os corpos moedores quando o moinho completa seu ciclo. Isso explica as forças menores para esse caso, já que não há muitas colisões e mais rolamentos entre as bolas.

O comportamento observado acima para as forças de colisão também pode ser percebido nos diâmetros das partículas encontrados nos experimentos de moagem, que estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Diâmetros médios das partículas após 5, 10 e 15 minutos de moagem, com 2, 4 e 6% de corpos moedores.

Tempo (min)	2%	4%	6%
5	0,5520	0,2418	0,4646
10	0,3689	0,2063	0,3893
15	0,3543	0,1939	0,2904

Fonte: Da autora.

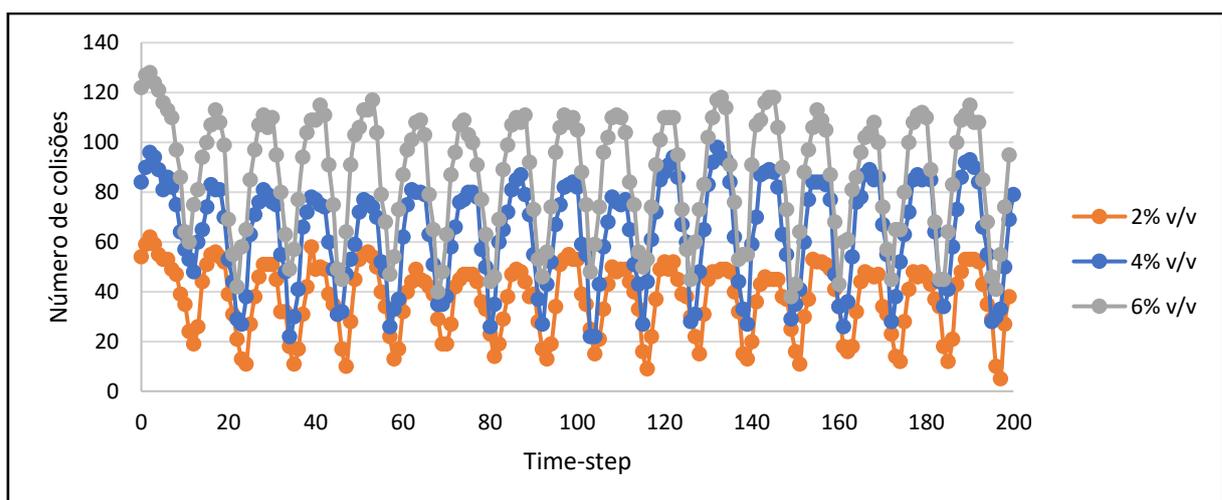
Como pode ser visto, os diâmetros das partículas de clínquer para a fração de 2% de enchimento são maiores que os diâmetros para 4% de fração de enchimento. Isso pode ser associado ao gráfico das forças de colisões, visto que, como as forças para 4% foram maiores do que para 2%, entende-se que a força maior contribuiu para uma melhor moagem. Porém, se esse raciocínio fosse levado à risca, esperava-se que os diâmetros das partículas para a moagem a 6% de corpos moedores fossem menores do que para a moagem a 4%, mas isso não ocorreu.

Isso pode ser analisado levando-se em conta, mais uma vez, as imagens das simulações, que mostram que a 6% as bolas apresentam mais um comportamento de rolagem umas sobre as outras do que queda propriamente dita, o que contribuiu para diminuir as forças de colisão e, conseqüentemente, deixou a moagem menos eficiente.

Analisou-se, também, o número e a intensidade das forças de colisões entre os corpos moedores e a parede, mostrados nas Figuras 4.21 e 4.22 respectivamente.

Pela Figura 4.21, pode-se notar que, à medida que a fração de bolas dentro do moinho aumenta, o número de colisões partícula-parede também aumenta. Assim como para o caso de partícula-partícula, nessa situação também era esperado que as colisões entre as bolas e a parede do tambor variassem proporcionalmente com a quantidade de corpos moedores, já que bolas e tambor são feitos do mesmo material e, como não há partículas incluídas na simulação, as colisões são inevitáveis e constantes.

Figura 4.21 - Número de colisões partícula-parede a 15 rpm.

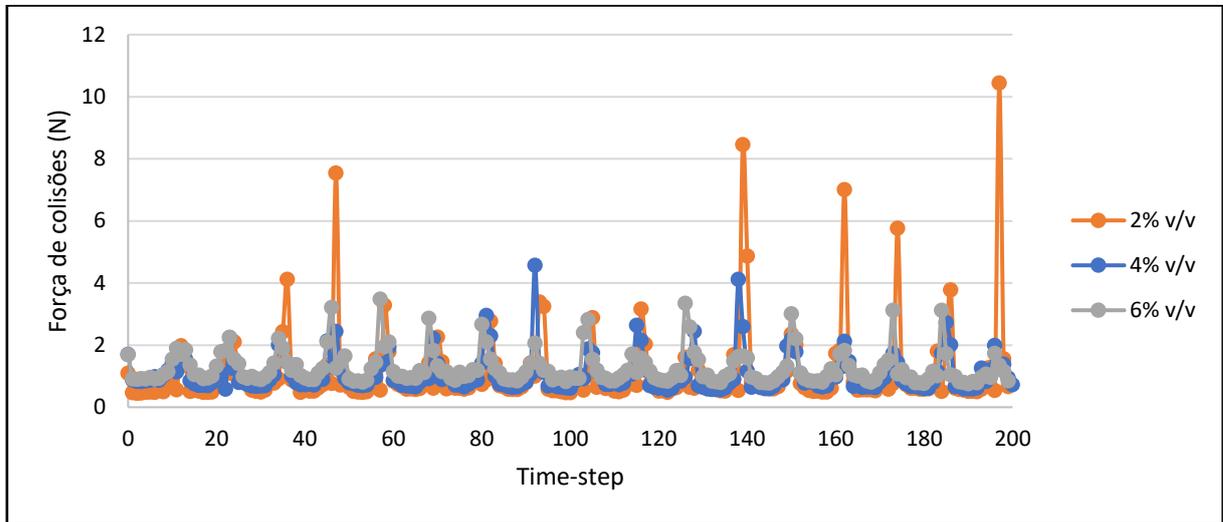


Fonte: Da autora.

Observa-se que, em comparação com as colisões entre as partículas, esses valores se apresentaram menores para as colisões entre partículas e parede, o que se justifica, pois a tendência dos corpos moedores no ciclo de movimento do tambor do moinho é cair uns sobre

os outros e não sobre as paredes. Porém, essas colisões ocorrem, visto que as primeiras bolas que caem sofrem colisão com a parede do moinho.

Figura 4.22 - Força de colisões partícula-parede a 15 rpm.



Fonte: Da autora.

Pela Figura 4.22, percebe-se que, para a fração de 2%, ocorreram picos das forças, o que se explica por acontecerem no momento em que as bolas caem do nível mais alto para o mais baixo. Os valores altos dessas forças podem ser explicados, tendo em vista que, quando as bolas caem, a probabilidade de atingirem a parede do tambor é muito maior do que a probabilidade de atingirem outra bola, devido à pequena quantidade de corpos moedores.

De um modo geral, analisando o efeito sobre o diâmetro das partículas, é plausível atribuir que a maior parte das colisões efetivas para a moagem são das colisões partícula-partícula e não partícula-parede.

5 CONCLUSÃO

A moagem em um moinho de bolas é um processo bastante presente em vários tipos de indústrias, inclusive nas cimenteiras. Por ser uma operação bastante requisitada e por, uma vez dentro da planta química, apresentar alto consumo de energia, estudos detalhados, geralmente experimentais e simulações, tornam-se de grande valia para que o processo seja otimizado de forma a garantir a maior redução de granulometria possível, de acordo com o objetivo que se quer atingir.

De maneira geral, para todos os experimentos realizados, a moagem se apresentou satisfatória logo nos primeiros 5 minutos de moagem, visto que os diâmetros, em todas as velocidades de rotação, nesse tempo, apresentaram valores significativamente menores do que o diâmetro inicial encontrado para as partículas. No experimento a 4% em volume de corpos moedores, em todas as velocidades, logo nos primeiros 5 minutos de moagem, os diâmetros das partículas apresentaram valores muito menores do que o valor do diâmetro inicial das partículas.

Quanto ao sucesso da moagem ao longo do tempo, notou-se que os diâmetros apresentaram maior redução de valores entre os tempos de 5 e 10 minutos e, a partir desse momento, as moagens passaram a ser menos eficientes. Isso explica porque, na indústria, o tamanho das bolas é diminuído ao longo do processo de moagem, visto que, até certo ponto, a operação é eficiente e após esse ponto, já não há mais redução da granulometria.

Dentre todas as quantidades de corpos moedores, o experimento com 4% foi o que apresentou maior diminuição dos diâmetros, após 15 minutos de moagem, se comparados ao inicial. Quanto às velocidades, os experimentos a 2 e 6% em volume de carga moedora apresentaram melhor moagem a 31 rpm. Já no experimento a 4% em volume de bolas, a velocidade de 15 rpm apresentou menor diâmetro, em relação ao inicial, após 15 minutos de moagem.

A análise estatística das superfícies de resposta permitiu concluir que, em todos os tempos de moagem, os menores diâmetros foram alcançados tanto em velocidades quanto em frações de enchimento intermediárias. Isso não foi exatamente observado na prática, pois o experimento a 4% em volume de carga moedora, teve como melhor velocidade de moagem, 15 rpm. Essa diferença entre o ajuste e o experimental é devida ao fato de que o valor de R^2 de 0,8139 não ser tão próximo de 1, o que indica que o ajuste pode não corresponder à realidade prática.

Analisando-se as colisões entre partícula-partícula e as colisões partícula-parede, observou-se que, à medida que a fração de bolas dentro do moinho aumentou, o número de

colisões também aumentou em ambas as análises. As forças de colisão entre as partículas são maiores para o tambor operando com 4% do volume preenchido por corpos moedores, o que se observa também nos resultados experimentais, visto que o experimento com essa fração de enchimento, foi o que apresentou menores diâmetros ao final da moagem. Para 6% em volume de corpos moedores, as esferas apresentam um comportamento diferente, visto que não há uma queda de um ponto mais alto até um ponto mais baixo, e sim, um rolamento entre os corpos moedores quando o moinho completa seu ciclo e isso explica as forças menores para esse caso.

Tendo em vista tudo o que foi exposto, conclui-se que os resultados das simulações e do tratamento estatístico foram fundamentais para explicar e analisar as ocorrências dos experimentos. Isso mostra a importância de se realizar um estudo detalhado do processo de moagem, para que todas as variáveis sejam consideradas no momento de se implementar tal operação.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. L. A. de; CUNHA, L. M. da S.; SILVA, M. do C. Desenvolvimento e perspectivas da indústria de cimento. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n.15, p. 35-62, 03/2002. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/13456>>. Acesso em: 04 out. 2019.

CAMPOS, P. A. M. **Cimento de baixo impacto ambiental produzido com resíduos industriais e de mineração**. 2017. 64 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/558>>. Acesso em: 04 out. 2019.

CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L. de; ALBERTIN, E. Ensaio de moagem piloto: referência para avaliação da taxa de desgaste de corpos moedores. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 28-33, out.-dez. 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Monica_Cassola/publication/269811925_Ensaio_de_moagem_piloto_Referencia_para_avaliacao_da_taxa_de_desgaste_de_corpos_moadores/links/552bbeb80cf2e089a3aa6616.pdf>. Acesso em: 04 out. 2019.

CASTRO, L. A. de. **Comparação dos produtos de moagem para produção de membrana porosa composto de vidro temperado reutilizado**. 2018. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/10485>>. Acesso em: 22 out. 2019.

CENTURIONE, S. L. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland**. 1993. 155 f. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-28082015-150715/en.php>>. Acesso em: 04 out. 2019.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos e outros trabalhos**. Editora Blucher, p. 126-157, 2014.

DANBY, M.; SHRIMPTON, J.; PALMER, M. On the optimal numerical time integration for DEM using Hertzian force models. **Computers & Chemical Engineering**, v. 58, p. 211-222, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.06.018>>. Acesso em: 22 out. 2019.

DE CARVALHO, R. M.; TAVARES, L. M. Predicting the effect of operating and design variables on breakage rates using the mechanistic ball mill model. **Minerals Engineering**, v. 43, p. 91-101, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.09.008>>. Acesso em: 04 out. 2019.

FERREIRA, L. C.; SCATENA, R.; DUARTE, R. ESTUDO DOS DIFERENTES REGIMES DE ESCOAMENTO PRESENTES EM UM TAMBOR ROTATÓRIO. XIX Jornada em Engenharia Química. 2014. Disponível em: <<http://www.peteq.feq.ufu.br/jorneq/anais2014/trabalhos/S58.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2019.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. Cominuição. **Comunicação técnica elaborada para a 4a edição do livro de Tratamento de Minérios**, p. 113-94, 2004.

FOGGIATTO, B. **Previsão de desempenho do circuito de moagem de Carajás**. 2009. 232 f. Dissertação (Tese em Engenharia Mineral) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-03072009-140900/en.php>>. Acesso em: 06 nov. 2019.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. 2003. 165 f. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-07072003-160408/en.php>>. Acesso em: 04 out. 2019.

HEMA, V. **Mathematical modelling of the dynamics of granular materials in a rotating cylinder**. Doctor Thesis - The Cochin University of Science and Technology, India, 2003. Disponível em: <<http://ir.niist.res.in:8080/jspui/handle/123456789/1173>>. Acesso em: 22 out. 2019.

LI, D. et al. Numerical simulation of different flow regimes in a horizontal rotating ellipsoidal drum. **Powder technology**, v. 291, p. 86-96, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.007>>. Acesso em: 06 nov. 2019.

LIMA, R. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a abordagem numérica lagrangeana**. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21261>>. Acesso em: 05 nov. 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. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2018. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/7176>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

MACHADO, M. V. C. **Estudo experimental e numérico da dinâmica de corpos moedores em moinhos de bola**. 2016. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15264>>. Acesso em: 26 set. 2019.

MARINGOLO, V. **Clinker co-processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. 2001. 174 f. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-16022006-132935/en.php>>. Acesso em: 04 out. 2019.

MELLMANN, J. The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior. **Powder technology**, v. 118, n. 3, p. 251-270, 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00402-2](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00402-2)>. Acesso em: 31 out. 2019.

MONTINI, M. **Aplicações de resíduo de bauxita e cinza pesada da indústria do alumínio na fabricação de cimento Portland**. 2009. 132 f. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)-Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/902>>. Acesso em: 22 out. 2019.

NANDI, V. S.; MONTEDO, ORK. Otimização do processo de moagem de engobes cerâmicos para produção de revestimento. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 14, n. 4, 2009. Disponível em: <<https://ceramicaindustrial.org.br/article/5876573d7f8c9d6e028b476b/pdf/ci-14-4-5876573d7f8c9d6e028b476b.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2019.

NASCIMENTO, S. M. **Estudo experimental e de simulação da dinâmica de material particulado em tambor rotatório com suspensores**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15249>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

NASCIMENTO, S. M. **Estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório com suspensores: análise experimental e numérica utilizando abordagens euleriana e lagrangeana - Uberlândia**. 2018. 107 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.775>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

OWEN, P.; CLEARY, P. W. The relationship between charge shape characteristics and fill level and lifter height for a SAG mill. **Minerals Engineering**, v. 83, p. 19-32, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.009>>. Acesso em: 22 out. 2019.

POWELL, 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, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.022>>. Acesso em: 22 out. 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. XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 1, p. 440- 447, Salvador, 2011. Disponível em:

<[https://www.artigos.entmme.org/download/2011/cominui%C3%A7%C3%A3o/2149%20-](https://www.artigos.entmme.org/download/2011/cominui%C3%A7%C3%A3o/2149%20-%20Ramos,%20E.S.-)

[SIMULA%C3%87%C3%83O%20DO%20MOVIMENTO%20DA%20CARGA%20EM%20MOINHOS%20DE%20BOLAS%20UTILIZANDO%20O%20M%C3%89TODO%20DOS%20ELEMENTOS%20DISCRETOS.pdf](https://www.artigos.entmme.org/download/2011/cominui%C3%A7%C3%A3o/2149%20-%20Ramos,%20E.S.-%20SIMULA%C3%87%C3%83O%20DO%20MOVIMENTO%20DA%20CARGA%20EM%20MOINHOS%20DE%20BOLAS%20UTILIZANDO%20O%20M%C3%89TODO%20DOS%20ELEMENTOS%20DISCRETOS.pdf)>. Acesso em: 06 nov. 2019.

RIBEIRO, M. R. **Investigação das características dos minérios de ferro da CVRD que Influenciam seu comportamento na moagem**. 2004. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2774>>. Acesso em: 22 out. 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, 2001. Disponível em:

<[https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/34311620/v6n2_1.pdf?response-](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/34311620/v6n2_1.pdf?response-content-)

disposition=inline%3B%20filename%3DMoagem_em_Moinho_de_Bolas_Estudo_de_algu.p
df&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-
Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20191127%2Fus-east-
1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20191127T100057Z&X-Amz-Expires=3600&X-
Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-
Signature=2ff976316fbbc1720d453d23989d2c905ce6572793b3cb704083be4a4d657342>.
Acesso em: 04 out. 2019.

ROCHA, S. D. F.; LINS, V. de F. C.; SANTO, B. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 1-10, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v16n1/a03v16n1>>. Acesso em: 22 out. 2019.

RODRIGUEZ, V. A. **Modelo mecanicista UFRJ aplicado à cominuição em moinhos de bolas descontínuos**. 2016. 149 f. 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: 22 out. 2019.

SANTI, A. M. M. O emprego de resíduos como combustíveis complementares na produção de cimento na perspectiva da energia, da sociedade e do meio ambiente. Estudo de caso: Minas Gerais no período de 1980-1997. 1997. 156f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/263942>>. Acesso em: 23 out. 2019.

SANTI, A. M. M.; SEVÁ FILHO, A. O. Combustíveis e riscos ambientais na fabricação de cimento: casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e possíveis generalizações. 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/1295/1/EVENTO_Combust%C3%ADveisRiscosAmbientais.pdf>. Acesso em: 04 out. 2019.

SANTOS, D. A. dos. **Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas granulares em um tambor rotatório**. 2015. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15091>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

SHERRITT, R. G. et al. Axial dispersion in the three-dimensional mixing of particles in a rotating drum reactor. **Chemical Engineering Science**, v. 58, n. 2, p. 401-415, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00551-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00551-1)>. Acesso em: 26 set. 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, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.04.093>>. Acesso em: 22 out. 2019.

SHREVE, R. N., BRINK Jr., J. A. Indústria de processos químicos, **Editora Guanabara Dois**, RJ, 1980.

TAYLOR, H.F.W. Enciclopedia de la química industrial - la química de los cementos. v. 1. Bilbao-Espanha: URMO, 1967.

TEIXEIRA, J. F. N. **Modelação de elementos estruturais reforçados com compósitos de FRP recorrendo ao método dos elementos discretos**. 2014. 170p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10362/13009>>. Acesso em: 22 out. 2019.

VARELA, N.; VIEIRA, F. S. Cimento: Uma matéria-prima essencial no fabrico de argamassas. In: **1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa**. 2005. Disponível em: <<https://www.apfac.pt/congresso2005/comunicacoes/paper%2037.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2019.

WATANABE, Hiroshi. Critical rotation speed for ball-milling. **Powder technology**, v. 104, n. 1, p. 95-99, 1999. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00031-5)>. Acesso em: 17 out. 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-Cominuicao-e-Moagem-em-Moinhos-Tubulares.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2019.