



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS



PRISCILA MEDEIROS MARINOVIC

EFEITO DA NATUREZA DOS CORPOS MOEDORES NA DISTRIBUIÇÃO
GRANULOMÉTRICA RESULTANTE DA MOAGEM ULTRAFINA DE
CALCÁRIO E DOLOMITO

Recife

2018

PRISCILA MEDEIROS MARINOVIC

EFEITO DA NATUREZA DOS CORPOS MOEDORES NA DISTRIBUIÇÃO
GRANULOMÉTRICA RESULTANTE DA MOAGEM ULTRAFINA DE
CALCÁRIO E DOLOMITO

Trabalho apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, como requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Minerais industriais

Linha de pesquisa: Tecnologia de minerais industriais

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Guzzo

Recife

2018

Catálogo na fonte

Bibliotecária: Neide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

M339e Marinovic, Priscila Medeiros.
Efeito da natureza dos corpos moedores na distribuição granulométrica resultante da moagem ultrafina de calcário e dolomito / Priscila Medeiros Marinovic. – Recife, 2018.
44 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Guzzo.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia de Minas, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia de Minas. 2. Moagem. 3. Minerais industriais. 4. Distribuição granulométrica. 5. Moinho planetário. 6. Corpos moedores. 7. Limite de moagem. I. Guzzo, Pedro Luiz (Orientador). II. Título.

623.26 CDD (22. Ed.)

UFPE/BCTG/2018 - 206

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

EFEITO DA NATUREZA DOS CORPOS MOEDORES NA DISTRIBUIÇÃO
GRANULOMÉTRICA RESULTANTE DA MOAGEM ULTRAFINA DE
CALCÁRIO E DOLOMITO

Relatório de conclusão de curso aprovado, apresentado a Universidade Federal de Pernambuco, no Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas, com nota final igual a 9,0, conferida pela Banca Examinadora.

Aprovado em: 30 de janeiro de 2018

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Pedro Luiz Guzzo, Departamento de Engenharia de Minas, UFPE.

Prof. Dr. Áureo Octávio Del Veechio Machado, Departamento de Engenharia de Minas, UFPE.

Prof. Dr. José Carlos da Silva Oliveira, Departamento de Engenharia de Minas, UFPE.

Filipe Brito Marinho de Barros, Engenheiro de Minas, UFPE.

Agradecimentos

Ao professor Pedro Guzzo, pela proposição do tema dessa monografia, orientação, dedicação e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas por toda a contribuição para o meu aprendizado. Em especial, ao professor Marcio Barros, por sempre ajudar no que fosse possível.

A todos que fazem parte do Laboratório de Tecnologia Mineral da UFPE (LTM), em especial ao técnico Marcelo Gomes, por todo suporte e incentivo, e ao amigo Filipe Barros por toda ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos que estiveram comigo durante toda a faculdade, em especial a Mayra Mendes, Raiza Juvenal e Thaisa Rezende. Aos amigos e amigas que de forma direta ou indireta contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, em especial a Savio Ferraz e Sofia Melo, por toda paciência e apoio.

Aos meus pais, Gerson e Lúcia Marinovic, e ao meu irmão, Dimitri Marinovic, por todo carinho, apoio e incentivo neste trabalho e em todos meus projetos de vida.

Resumo

O calcário e o dolomito são rochas carbonáticas com larga utilização. Quando utilizados em granulometria ultrafina ($<10\ \mu\text{m}$) são empregados na produção de papel e celulose, fármacos, cimento e pigmentos. Os moinhos de alta energia são utilizados para produzir partículas nesta faixa granulométrica, porém o processo precisa de um controle adequado uma vez que, ocorre o mecanismo de aglomeração das partículas devido à ação mecânica da moagem. Este trabalho teve como objetivo investigar a influência da natureza dos corpos moedores na distribuição granulométrica do calcário e dolomito utilizados em ensaios de moagem de alta energia. Para isso foi utilizado dois tipos de amostras: calcário (Currais Novos, RN), com predominância de calcita (CaCO_3) e dolomito (Jandaíra, RN), com predominância de dolomita ($\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$); ambas empregadas em trabalhos anteriores (Barros 2015; Barros 2016). Para este estudo, as amostras foram preparadas em moinho cilíndrico de porcelana. Os ensaios de moagem foram realizados em um moinho planetário de bolas, com velocidade de revolução de 300 rpm, em treze intervalos de tempo (entre 1 e 3840 minutos), via seco. Neste estudo foi utilizado potes (250 ml) e bolas (25; 10 mm) de aço, enquanto que nos trabalhos anteriores foram utilizados potes e bolas de zircônia. As análises granulométricas foram realizadas em um granulômetro a laser, via úmido. A partir do resultado da área superficial específica (S) e do diâmetro médio (D_{50}) das partículas foi possível determinar o limite de moagem do calcário e dolomito. Ao comparar o efeito da natureza dos corpos moedores sobre a distribuição granulométrica do produto, os resultados mostraram que o calcário atinge o limite de moagem após 60 minutos, tanto ao utilizar corpos moedores de aço ($D_{50} = 12,85 \pm 1,37\ \mu\text{m}$) como de zircônia ($D_{50} = 12,33 \pm 0,58\ \mu\text{m}$). Por sua vez, o dolomito alcançou este limite com tempos de moagem diferentes, após 120 minutos utilizando corpos moedores de aço ($D_{50} = 7,09 \pm 0,28\ \mu\text{m}$) e após 480 minutos com zircônia ($D_{50} = 6,35 \pm 0,09\ \mu\text{m}$). Esses resultados foram discutidos a partir da diferença de microestrutura e dureza do calcário e dolomito.

Palavras-Chave: Moagem. Minerais industriais. Distribuição granulométrica. Moinho planetário. Corpos moedores. Limite de moagem.

Abstract

The limestone and dolostone are carbonated rocks with wide use. When used in ultrafine size ($<10\ \mu\text{m}$) are used in the production of paper and cellulose, pharmaceuticals, cement and pigments. The high energy mills are used to produce particles in this size range, but the process needs an adequate control since, the agglomeration mechanism of the particles occurs due to the mechanical action of the grinding. The objective of this work was to investigate the influence of the grinding bodies nature on the particle size distribution of limestone and dolostone used in high energy milling tests. For this, two types of samples were used: limestone (Currais Novos, RN), with predominance of calcite (CaCO_3) and dolostone (Jandaíra, RN), predominantly dolomite ($\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$); both employed in previous works (Barros 2015; Barros 2016). For this study, the samples were prepared in cylindrical porcelain mill. The grinding tests were carried out in a planetary ball mill, with revolution speed of 300 rpm, in thirteen time intervals (between 1 and 3840 minutes), dry. In this study, pots (250 ml) and balls (25; 10 mm) of steel were used, while in previous works pots and balls of zirconia were used. The particle size analyzes were performed with a laser particle size analyzer, wet. From the result of the specific surface area (S) and the mean diameter (D_{50}) of the particles, it was possible to determine the limit of grinding of limestone and dolostone. When comparing the effect of the nature of the grinding bodies on the particle size distribution of the product, the results showed that limestone ($D_{50} = 12.85 \pm 1.37\ \mu\text{m}$) and the zirconia ($D_{50} = 12.33 \pm 0.58\ \mu\text{m}$). In turn, the dolostone reached this limit with different milling times, after 120 minutes using steel grinding bodies ($D_{50} = 7.09 \pm 0.28\ \mu\text{m}$) and after 480 minutes with zirconia ($D_{50} = 6.35 \pm 0.09\ \mu\text{m}$). These results were discussed from the difference in microstructures and hardness of limestone and dolostone.

Keywords: Grinding. Industrial minerals. Particle size distribution. Planetary mill. Grinding bodies. Milling limit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração do funcionamento do moinho planetário mostrando os movimentos de revolução e rotação do disco e pote, respectivamente.	13
Figura 2 - Trajetórias dos corpos moedores no interior do pote.	14
Figura 3 - Variação do diâmetro do tamanho médio (d_{50}) em função do tempo de moagem. Com diferentes velocidades de revolução (a) e tamanhos corpos moedores (b).	15
Figura 4: Fluxograma dos passos seguidos entre os ciclos de moagem da preparação das amostras.	18
Figura 5 - Moinho planetário Fritsch P-5, potes e bolas de aço utilizados.	19
Figura 6 - Curva característica da análise granulométrica do calcário e dolomito moído a 300 rpm por 8 minutos.	21
Figura 7 - Massa e finos produzidos nos ciclos intermediários de moagem durante a preparação das amostras de calcário (a) e dolomito (b).	23
Figura 8 - Imagens características do pote, bolas e produto da moagem de calcário após diferentes tempos de moagem.	25
Figura 9 - Imagens características do pote, bolas e produto da moagem de dolomito após diferentes tempos de moagem.	27
Figura 10 - Perda de massa na limpeza dos potes em função do tempo de moagem.	28
Figura 11 - Imagens detalhadas da compactação das partículas ultrafinas do calcário (a) e (b), e do dolomito (c) e (d) nas paredes dos potes e nos corpos moedores.	29
Figura 12 - Curvas de distribuição granulométrica do calcário em cada tempo de moagem realizado neste estudo. Tempos de moagem entre 0 e 15 minutos (a), 30 e 120 minutos (b), 240 e 960 minutos (c) e 1920 e 3840 minutos (d). ...	31
Figura 13 - Curvas de distribuição granulométrica do dolomito em cada tempo de moagem realizado neste estudo. Tempos de moagem entre 0 e 15 minutos (a), 30 e 120 minutos (b), 240 e 960 minutos (c) e 1920 e 3840 minutos (d). ...	32
Figura 14 - Variação do D_{10} (a), D_{50} (b), D_{90} (c) e da heterogeneidade (d) em função do tempo de moagem para o calcário e dolomito. A figura inserida em (b) mostra os valores de D_{50} entre os tempos de 10 e 3840 minutos de moagem.	34
Figura 15 - Variação da área superficial específica (S) das partículas em função do tempo de moagem do calcário e do dolomito.	35
Figura 16 - Imagens características de placas de calcário (a) e dolomito (b) lapidadas.	36
Figura 17 - Variação do D_{50} e da área superficial específica (S) em função do tempo de moagem, relacionando as variedades de material dos corpos moedores empregados. As figuras (a) e (c) apresentam as variações entre os corpos moedores para o calcário. As figuras (b) e (d) mostram essas variações para o dolomito.	37
Figura 18 - Variação da heterogeneidade em função do tempo de moagem, relacionando as variedades de material dos corpos moedores empregados. A figura (a) apresenta a variação entre os corpos moedores para o calcário. A figura (b) mostra essa variação para o dolomito.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações da carga dos corpos moedores e do moinho cilíndrico utilizado na preparação de partes das amostras.....	17
Tabela 2 - Especificações do moinho planetário Fritsch P-5, dimensão dos potes e a carga de corpos moedores.	19
Tabela 3 - Programação utilizada para realizar os ensaios de moagem de alta energia.	20
Tabela 4 - Massas empregadas na preparação das alíquotas utilizadas neste estudo e número de alíquotas preparadas para cada material.	24
Tabela 5 - Caracterização do limite de moagem do calcário e do dolomito utilizando corpos moedores de aço e de zircônia.....	39

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1	Aplicação de calcário e dolomito ultrafino	12
2.2	Moagem de alta energia no moinho planetário.....	12
2.2.1	Variáveis operacionais do moinho planetário	14
3	METODOLOGIA	16
3.1	Procedência e preparação das amostras	16
3.2	Moagem de alta energia.....	18
3.3	Análise granulométrica	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1	Massa e finos produzidos durante a preparação das amostras ..	23
4.2	Análise qualitativa do produto da moagem.....	24
4.3	Análise dimensional do produto da moagem	29
4.4	Análise comparativa com corpos moedores de zircônia	36
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

O calcário e o dolomito são as principais variedades de rochas carbonáticas, ou seja, rochas que possuem em sua composição primária o íon carbonato (CO_3^{2-}). Essas rochas são encontradas extensivamente em todos os continentes e extraídas de depósitos que variam em idade, desde o Pré-Cambriano até o Holoceno. Mineralogicamente o calcário é composto, basicamente, por calcita ($CaCO_3$) e o dolomito é composto, predominantemente, pelo mineral dolomita ($CaCO_3.MgCO_3$). Uma outra forma de classificação é feita através do percentual de óxido de cálcio e magnésio presente na rocha. Para um calcário o teor de óxido de cálcio (CaO) deve ser superior a 50%. Para o dolomito os teores dos óxidos de cálcio e magnésio (CaO e MgO) devem ser aproximadamente 30% e 20%, respectivamente (SAMPAIO E ALMEIDA, 2008).

Talvez não exista outras rochas com uma variedade de uso tão ampla quanto o calcário e dolomito (SAMPAIO E ALMEIDA, 2008). Essas rochas podem ser utilizadas nas atividades agrícolas para a produção de fertilizantes, na construção civil como material para agregado e também para produzir cimento e cerâmicas, no campo da metalurgia como carga fundente, na fabricação de vidros e na indústria química (LINS, 2007). Neste sentido são insumos minerais sempre presente na maioria dos setores da indústria moderna (SAMPAIO E ALMEIDA, 2008). As propriedades do estado particulado dessas rochas como pureza, tamanho e morfologia das partículas, determinam as funções, os desempenhos e as aplicações industriais das mesmas (SINTON, 2006). E assim como outros insumos minerais, o calcário e o dolomito podem ser utilizados em granulometria fina ($<100 \mu m$) e ultrafina ($<10 \mu m$). Nessas granulometrias, o calcário e dolomito são empregados na produção de papel, celulose, cimento, fármacos e pigmentos (SAMPAIO E ALMEIDA, 2008). Devido à grande aplicação, os estudos sobre os processos de cominuição dessas rochas assumem um papel fundamental.

A moagem de alta energia é o processo mais utilizado para obtenção de produtos em dimensões finas ($<100 \mu m$) e ultrafinas ($<10 \mu m$). Esse tipo de moagem é realizado em moinhos a jato, de rotor, vibratório, centrífugo e planetário (WELLEMKAMP, 1999). No entanto, vale ressaltar que a obtenção

de produtos em dimensões ultrafinas ainda é de difícil controle, devido às dificuldades de escalonamento do processo de moagem. Além disso ocorre o efeito de aglomeração das partículas submicrométricas, que amortecem os impactos dos corpos moedores reduzindo a eficiência do processo da moagem (MIO et al. 2004). Assim, o processamento de moagem é uma das etapas mais dispendiosas do tratamento de minérios devido ao seu alto consumo de energia (FIGUEIRA, LUZ e ALMEIDA, 2010).

Nos processos de moagem, em moinho planetário, existem algumas variáveis operacionais como: fator de enchimento dos potes, velocidade de revolução dos potes do moinho, tamanho e natureza dos corpos moedores. Assim, para otimização das variáveis operacionais são realizados alguns testes. Uma vez que os minerais industriais assumem ampla aplicação e importância, verifica-se a necessidade de um maior conhecimento na área de moagem ultrafina dos mesmos. Com o objetivo de ampliar esse conhecimento vêm sendo realizados estudos, no Laboratório de Tecnologia Mineral da UFPE (LTM), sobre a moagem de alta energia de alguns minerais industriais. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar o efeito que corpos moedores de duas naturezas, aço e zircônia, apresentaram na distribuição granulométrica resultante da moagem ultrafina de calcário e dolomito. Em estudos realizados anteriormente (Barros, 2015; Barros, 2016) foram efetuados ensaios de moagem, de calcário e dolomito, em um moinho planetário, utilizando corpos moedores de zircônia. Este estudo seguiu a mesma metodologia, porém os ensaios foram realizados com corpos moedores de aço.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aplicação de calcário e dolomito ultrafino

O emprego do calcário ultrafino destaca-se por sua importância na produção de cimento. O calcário também é utilizado na indústria de plástico para melhorar as propriedades físicas e as características de processabilidade. Sua adição, na granulometria ultrafina, promove ao aumento da condutividade térmica está cinco vezes acima do polietileno ou polipropileno. São produzidos plásticos para fraldas, materiais de construção, produtos automotivos, embalagens de alimentos e outros (SAMPAIO E ALMEIDA, 2008). O calcário e dolomito são extensivamente utilizados na produção de tintas. O material ultrafino destina-se à cobertura de clareamento. Este produto permite a aplicação da tinta sobre a superfície em forma de finos leitos e exibe um brilho mais intenso (SAMPAIO E ALMEIDA, 2008). A calcita é utilizada na indústria de papel e celulose, na faixa ultrafina, substituindo o caulim e o óxido de titânio, nas aplicações como carga e cobertura (LUZ, 1998). A dolomita ocupa o terceiro lugar como insumo básico na fabricação do vidro. É utilizada como estabilizador para melhorar a resistência do vidro contra ataques por gases e umidade, e também atua na redução da temperatura de fusão, aumentando a trabalhabilidade (SAMPAIO E ALMEIDA, 2008).

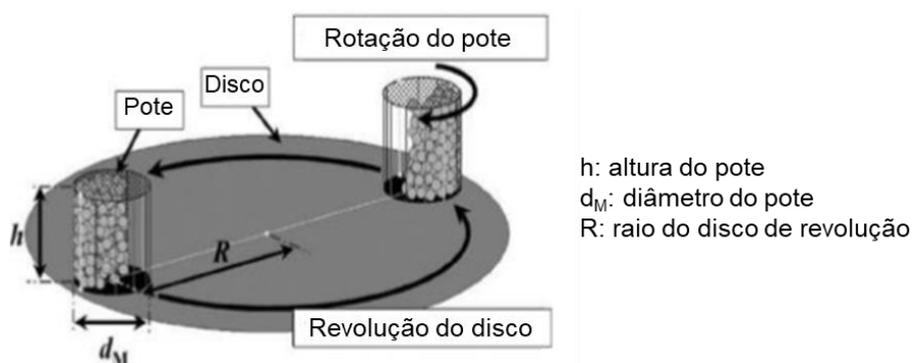
2.2 Moagem de alta energia no moinho planetário

Os minerais são materiais cristalinos, onde os átomos e/ou íons estão em arranjos tridimensionais. Nestes sólidos cristalinos ocorrem falhas microscópicas, denominadas microtrincas. Segundo Griffith, essas falhas ajudam na fragmentação das partículas, uma vez que as microtrincas atuam como concentradoras de tensões. No processo de moagem, forças mecânicas são aplicadas nas partículas e a fragmentação ocorre quando a elevação de tensão, na extremidade da microtrinca, atinge um nível crítico, iniciando a sua propagação (KING, 2001; WELLEMKAMP, 1999). Entretanto ao reduzir a granulometria das partículas também há uma redução da densidade de microtrincas por unidade de volume da partícula, acarretando maior consumo de energia nas etapas seguintes (MIO et al. 2004). A moagem de alta energia é empregada para produzir partículas nas dimensões finas e ultrafinas (CABRAL;

OGASAWARA; TAVARES, 2001). Esse tipo de moagem é realizado em moinhos a jato, de rotor, vibratório, centrífugo e planetário (WELLEMKAMP, 1999).

Os moinhos planetários são utilizados para a redução do tamanho de partículas em escala laboratorial, devido ao volume limitado dos potes que atuam como câmaras de moagem (≤ 2000 ml). Estes moinhos produzem partículas finas ($< 100 \mu\text{m}$) e ultrafina ($< 10 \mu\text{m}$). Possuem 2 ou 4 potes com volume variando entre 80 e 2000 ml (volume do pote) e os corpos moedores (bolas). A moagem pode ser realizada via seco ou via úmido e os principais esforços, para a fragmentação das partículas, são impacto e atrito. Os potes estão conectados a um disco que gira em torno de um eixo central comum, enquanto que os potes giram, simultaneamente, em torno do seu próprio eixo (BURMEISTER E KWADE, 2013). Ocorrem os movimentos de revolução e rotação, similar ao movimento dos planetas, como mostra a Figura 1.

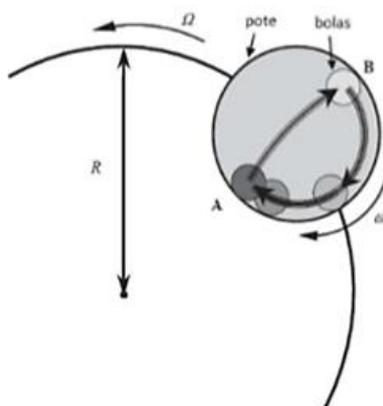
Figura 1 - Ilustração do funcionamento do moinho planetário mostrando os movimentos de revolução e rotação do disco e pote, respectivamente.



Fonte: adaptado, MIO, KANO e SAITO (2004).

O sentido de rotação do pote é geralmente oposto ao sentido de rotação do disco. Isso faz com que os corpos moedores sofram ação da força centrífuga e da força inercial de Coriolis (MIO, KANO e SAITO, 2004). A força centrífuga causa a fragmentação das partículas por atrito. A força inercial de Coriolis provoca a fragmentação das partículas por impacto. A Figura 2 mostra o efeito do movimento dos potes nos corpos moedores.

Figura 2 - Trajetórias dos corpos moedores no interior do pote.

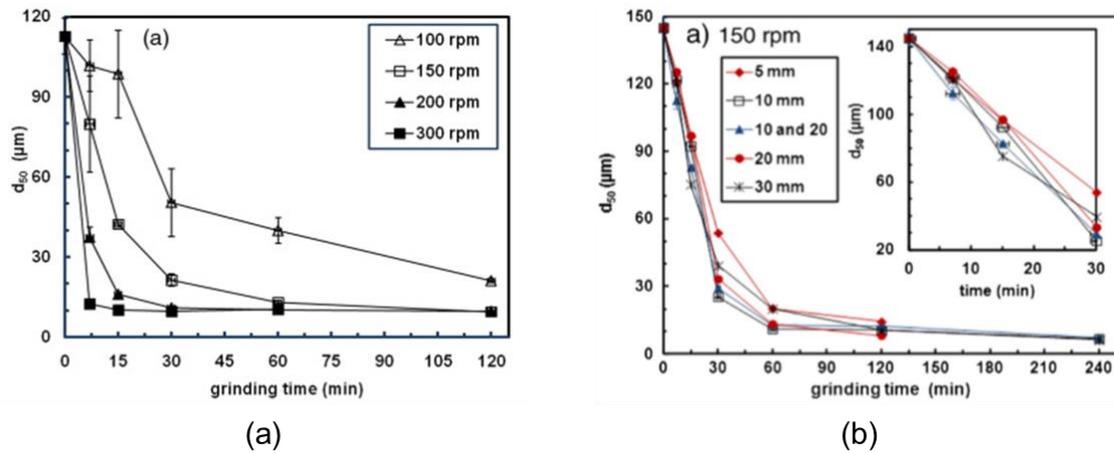


Fonte: adaptado, MIO, KANO e SAITO (2004).

2.2.1 Variáveis operacionais do moinho planetário

No moinho planetário existem algumas variáveis operacionais como: fator de enchimento dos potes, velocidade de revolução dos potes do moinho, tempo de moagem, tamanho e natureza dos corpos moedores. E essas variáveis operacionais podem ser alteradas com o objetivo de aumentar a eficiência da moagem. Foi observado por Guzzo, Tino e Santos (2015) que ao aumentar a velocidade de revolução dos potes do moinho são produzidas partículas com menor granulometria. Foi observado por Guzzo, Santos e David (2014) que o tamanho dos corpos moedores pode ser alterado e a partir de teste é possível encontrar o tamanho mais adequado para o processo de moagem. A Figura 3 apresenta os efeitos do tamanho dos corpos moedores e da velocidade de revolução no tamanho médio das partículas (d_{50}).

Figura 3 - Variação do diâmetro do tamanho médio (d_{50}) em função do tempo de moagem. Com diferentes velocidades de revolução (a) e tamanhos corpos moedores (b).



Fonte: adaptado, GUZZO, TINO E SANTOS (2015) e GUZZO, SANTOS E DAVID (2014).

Em um estudo realizado por Mio, Kano e Saito (2004) foi proposta a Equação (1), qual seja:

$$Ei = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} (\rho \cdot V) v_{r,j}^2 \quad (1)$$

em que, ρ é a densidade do material da bola, V é o volume da bola, V_r é a velocidade relativa das bolas e n é o número de colisões.

A partir da Eq. (1) foi possível relacionar a energia de impacto dos corpos moedores a natureza dos mesmos. Uma vez que a energia de impacto é diretamente proporcional a densidade dos corpos moedores. Então, ao utilizar corpos moedores de maior densidade, a energia de impacto será maior e teoricamente a fragmentação das partículas também.

3 METODOLOGIA

3.1 Procedência e preparação das amostras

Neste estudo foram utilizadas amostras de calcário e dolomito, anteriormente britadas, classificadas e analisadas por Barros (2015). O calcário é proveniente de Currais Novos (RN), mina Brejuí (empresa Tomaz Salustino) e o dolomito é procedente de Jandaira (RN), usina eólica Baixa do Meio. A caracterização preliminar utilizando a difração por raios X, evidenciou a predominância de calcita (90%) no calcário e de dolomita (95%) no dolomito.

Na metodologia empregada por Barros (2015) utilizou-se a granulometria de alimentação, para o ensaio de moagem, na faixa de 850 x 425 μm . Como as amostras na faixa de alimentação preparada por Barros (2015) eram insuficientes para realizar os ensaios de moagem propostos neste estudo, foi necessário preparar novas amostras na faixa granulométrica desejada a partir do material com granulometria superior. Para isso, foram utilizadas aproximadamente 1,2 kg de cada variedade de material, com granulometria >850 μm . Inicialmente, uma peneira de 425 μm foi utilizada para remover partículas finas eventualmente produzidas durante a estocagem. Em seguida, o material com granulometria >425 μm teve sua granulometria adequada à faixa 850 x 425 μm . Para adequar a granulometria do material foi utilizado um moinho cilíndrico de porcelana, com corpos moedores também de porcelana. A Tabela 1 apresenta as especificações da carga dos corpos moedores e do moinho cilíndrico utilizados nesta etapa. A massa da alimentação empregada em cada ciclo de moagem foi de aproximadamente 200 g e o procedimento de moagem foi realizado sucessivas vezes, até que todo o material atingisse a faixa granulométrica requerida. Entre cada ciclo de moagem alguns passos foram seguidos, como observa-se no fluxograma da Figura 4.

O separador magnético de alta intensidade *Inbrás-EriezRe-Roll5* foi utilizado para remover as partículas metálicas provenientes das etapas de britagem, realizada por Barros (2015). Posteriormente, o material remanescente do trabalho de Barros (2015) e o material preparado neste estudo foram homogeneizados, por meio de duas pilhas cônicas. A preparação das alíquotas, empregadas nos ensaios de moagem, foi realizada com uma

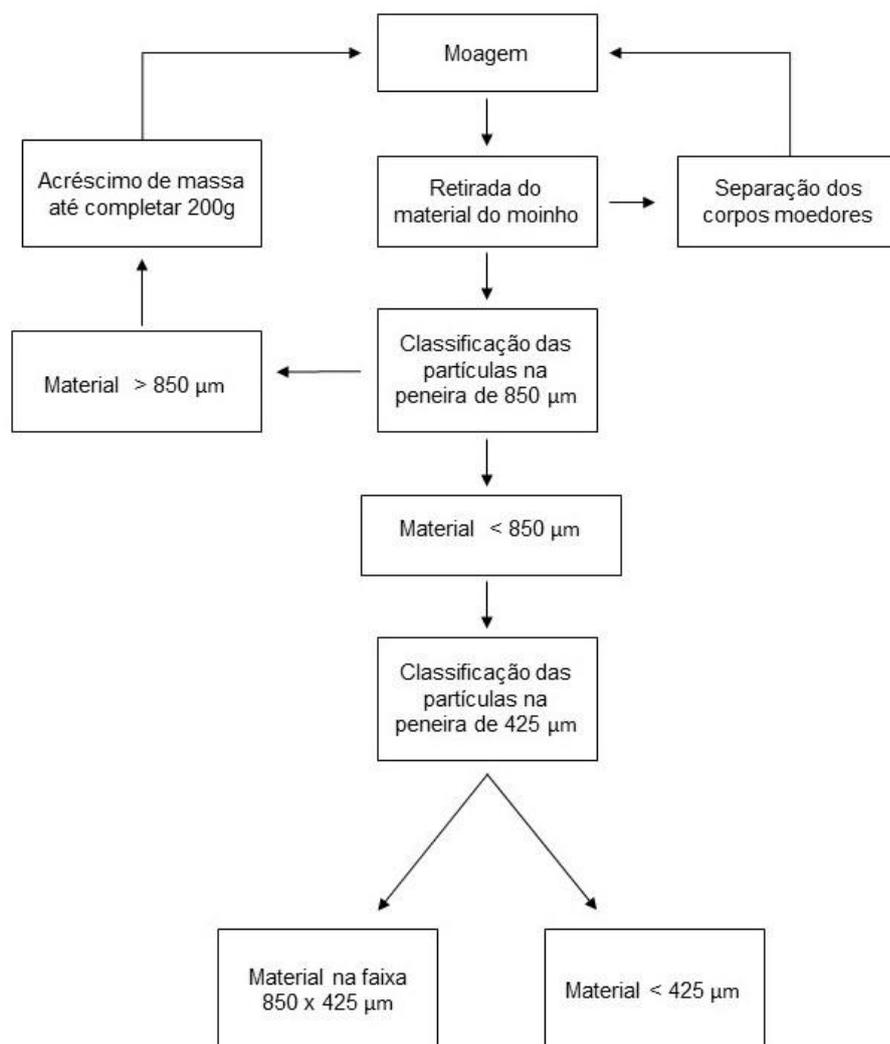
proveta, no intuito de padronizar o volume de 40 ml, que corresponde a uma massa de aproximadamente 60 g.

Tabela 1 - Especificações da carga dos corpos moedores e do moinho cilíndrico utilizado na preparação de partes das amostras.

Corpos moedores				
Tipo	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Quantidade	Volume (ml)
Bola	15	-	5	8,84
	21	-	12	58,19
	37	-	2	53,04
Cilindro	11	11	9	94,08
Total			28	214,15
Moinho cilíndrico				
Diâmetro (mm)		Altura (mm)		Volume (ml)
128		135		1800

Fonte: Autor

Figura 4: Fluxograma dos passos seguidos entre os ciclos de moagem da preparação das amostras.



Fonte: Autor

3.2 Moagem de alta energia

Os ensaios de moagem de alta energia foram realizados em um moinho planetário Fritsch, modelo Pulverisette 5, utilizando potes de aço-ferramenta e bolas de aço de rolamento, com densidade nominal de $7,8 \text{ g/cm}^3$. A Figura 5 apresenta o equipamento e os acessórios utilizados. A Tabela 2 apresenta as especificações do moinho, a dimensão dos potes e a carga dos corpos moedores. Seguindo a metodologia empregada por Barros (2015), a massa da alimentação utilizada em cada ensaio de moagem foi de aproximadamente 60 g e foram utilizadas duas alíquotas, uma de calcário e uma de dolomito, as quais foram moídas simultaneamente, em potes distintos. Os ensaios foram

realizados via seco e com uma velocidade de revolução do moinho de 300 rpm. Para este estudo os ensaios de moagem foram realizados com tempos entre 1 e 3840 minutos (1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 960, 1920 e 3840 minutos).

Figura 5 - Moinho planetário Fritsch P-5, potes e bolas de aço utilizados.



Fonte: Autor

Tabela 2 - Especificações do moinho planetário Fritsch P-5, dimensão dos potes e a carga de corpos moedores.

Especificações do moinho e acessórios	Descrição
Velocidade do disco de revolução	50 - 400 rpm
Relação rotação/revolução	- 2,19
ddp/potência nominal	110 V/1300 W
Diâmetro do disco de revolução	250 mm
Diâmetro do disco de rotação	123 mm
Altura dos potes	57 mm
Diâmetro dos potes	75 mm
Volume dos potes	250 ml
Diâmetro das bolas	10 mm
Número de bolas por pote	25
Fator de enchimento	22%

Fonte: Adaptado, Santos (2016)

Para os tempos de moagem de 1 e 2 minutos, o moinho foi programado para realizar os ensaios em uma única etapa. Para os tempos de 4 e 8 minutos de moagem os ensaios foram realizados em intervalos de 2 minutos, com 2 minutos de pausa entre um intervalo e outro. Para o tempo de 15 minutos, o ensaio foi realizado em intervalos de 5 minutos e pausa de 2 minutos. A partir de 30 minutos de moagem, os ensaios foram realizados em intervalos de 15 minutos com pausa 2 minutos. Cabe destacar que a pausa indica o momento em que ocorre a inversão da direção de rotação do moinho. A Tabela 3 apresenta a programação utilizada para realizar os ensaios de moagem.

Tabela 3 - Programação utilizada para realizar os ensaios de moagem de alta energia.

Tempo de moagem (min)	Intervalo de moagem (min)	Repetições	Pausa (min)
1	1	1	0
2	2	1	0
4	2	2	2
8	4	2	2
15	5	2	2
30	15	2	2
60	15	4	2
120	15	8	2
240	15	16	2
480	15	32	2
960	15	64	2
1920	15	128	2
3840	15	256	2

Fonte: Autor

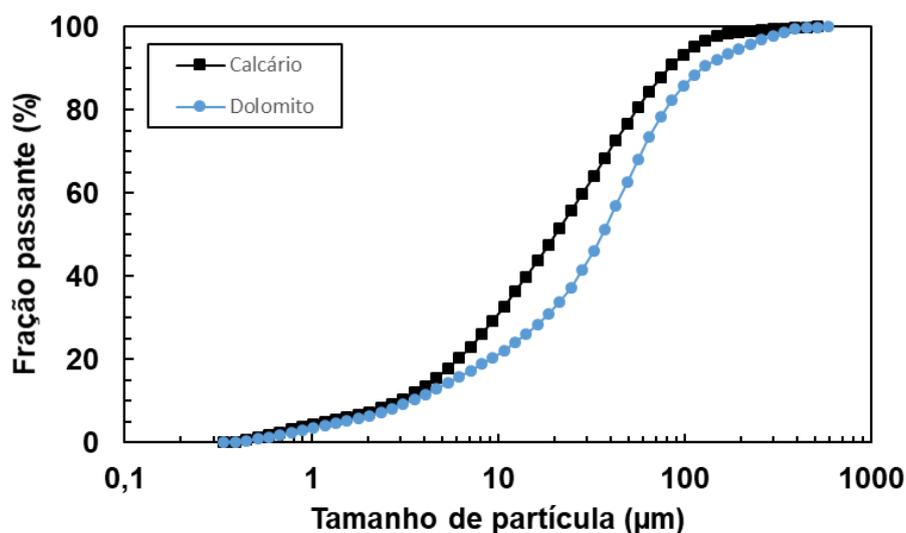
O aumento no tempo de moagem ocasionou em uma compactação do material nas paredes do pote e na superfície das bolas. Para o calcário a compactação iniciou em 30 minutos de moagem. Para o dolomito essa compactação começou em 60 minutos de moagem. Para a limpeza dos potes e das bolas após os menores tempos de moagem foi utilizado um papel úmido, uma vez que o material compactado foi removido facilmente. Entretanto, a partir dos 240 minutos de moagem, para as duas variedades de material, utilizar um papel úmido para a limpeza tornou-se ineficiente, pois ainda restava uma camada de material compactado muito difícil de retirar. Por isso, para a

remoção completa do material compactado foi utilizado ácido clorídrico (HCl), em concentração de 10%.

3.3 Análise granulométrica

As análises granulométricas do produto, resultante dos ensaios de moagem, foram realizadas em um granulômetro a laser *Malvern*, modelo *Mastersizer 2000*, via úmido utilizando o acessório *Hydro 2000*. As análises granulométricas foram realizadas inicialmente em triplicata (três medidas), sendo que cada medida corresponde à média de três leituras. Para as amostras que apresentaram grande dispersão entre as três medidas, foram realizadas mais duas ou três medidas. O resultado da análise corresponde à média dos valores encontrados em todas as medidas. A Figura 6 apresenta curvas características da análise granulométrica do calcário e do dolomito.

Figura 6 - Curva característica da análise granulométrica do calcário e dolomito moído a 300 rpm por 8 minutos.



Fonte: Autor

A partir de cada curva, foram determinados os diâmetros nominais d_{10} , d_{50} e d_{90} que corresponde à abertura em que passam 10, 50 e 90% do volume total do material analisado, respectivamente. A heterogeneidade da distribuição granulométrica (Ht), pode ser avaliada através dos diâmetros nominais e foi definida pela Equação (2), qual seja:

$$Ht = \frac{(d_{90} - d_{10})}{d_{50}} \quad (2)$$

Quando o valor da heterogeneidade é alto, sugere-se uma maior variação do tamanho de partícula e caracteriza uma amostra heterogênea. Quando o valor da heterogeneidade é baixo, indica uma pequena variação do tamanho de partícula e a amostra é considerada homogênea. Para calcular a área superficial específica (S) o software do granulômetro utiliza a Equação (3) proposta por Josef Sauter, qual seja:

$$S = \left(\frac{6}{\rho \cdot D[3,2]} \right) \quad (3)$$

em que, D [3,2] é o diâmetro médio de Sauter e ρ é a massa específica do material analisado. Para calcular a área de superfície específica foram utilizados os valores de massa específica do mineral predominante em cada variedade, calcita ($2,72 \text{ g/cm}^3$) para o calcário e dolomita ($2,87 \text{ g/cm}^3$) para o dolomito.

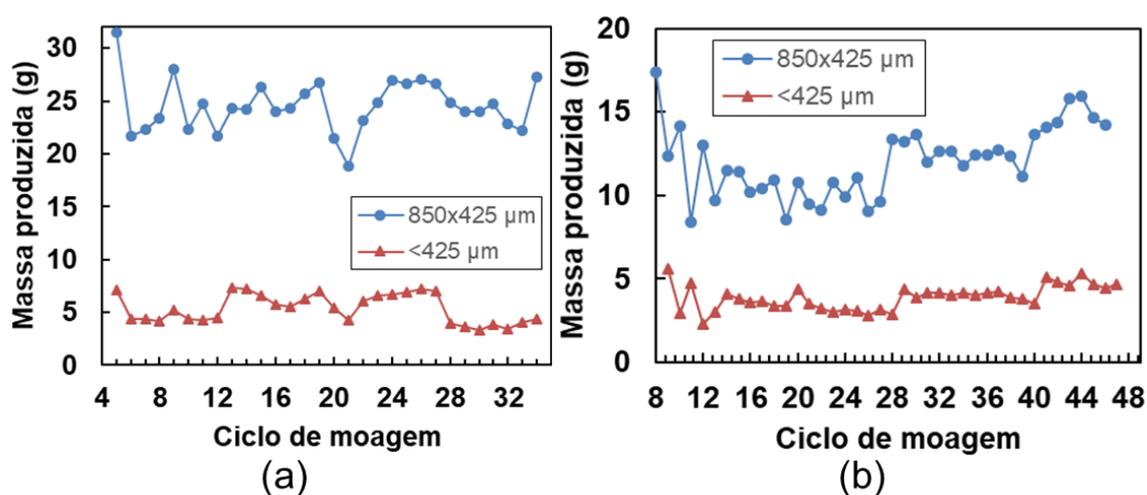
Para avaliar os dados foi necessário calcular a média de cada parâmetro (d_{10} , d_{50} , d_{90} , S e heterogeneidade), em seguida foi calculado o desvio padrão amostral, que indica uma medida de dispersão dos dados em torno da média. Também foi calculado o coeficiente de variação, que relaciona média e o desvio padrão, indicando o grau de dispersão relativa dos valores encontrados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Massa e finos produzidos durante a preparação das amostras

A Figura 7 apresenta a quantidade de massa e finos, de calcário e dolomito, que foram produzidos em cada ciclo de moagem. Ao comparar as Figuras 7(a) e 7(b), nota-se que a produção de massa (850 x 425 μm) e finos (<425 μm) do calcário, a cada ciclo, foi superior à do dolomito. As massas produzidas de calcário e dolomito, a cada ciclo, foram de $24,55 \pm 2,50$ g e $12,06 \pm 2,14$ g, respectivamente. As partículas do dolomito apresentaram maior dificuldade para serem cominuídas. Pois foram necessários 88 ciclos de moagem para que todo o material atingisse a faixa granulométrica requerida. Enquanto que, com 52 ciclos de moagem foi produzida, aproximadamente, a mesma quantidade de material de calcário. Inicialmente, foram realizados alguns testes para estabelecer os parâmetros satisfatórios para esse processo de moagem. Assim, a Figura 7 apresenta os ciclos consecutivos, em que os parâmetros adotados foram mantidos constantes.

Figura 7 - Massa e finos produzidos nos ciclos intermediários de moagem durante a preparação das amostras de calcário (a) e dolomito (b).



Fonte: Autor

A Tabela 4 apresenta a massa de material na faixa granulométrica requerida e o número de alíquotas preparada de cada variedade de material. Para os ensaios de moagem deste estudo foram utilizadas 14 alíquotas de calcário e 14 alíquotas de dolomito na faixa 850 x 450 μm .

Tabela 4 - Massas empregadas na preparação das alíquotas utilizadas neste estudo e número de alíquotas preparadas para cada material.

Faixa (μm)	Amostra	Calcário	Dolomito
850 x 425	Barros (2015)	510,04 g	882,67 g
	Este estudo	971,71 g	934,33 g
	Total	1481,75 g	1817 g
	Número de alíquotas	24	29

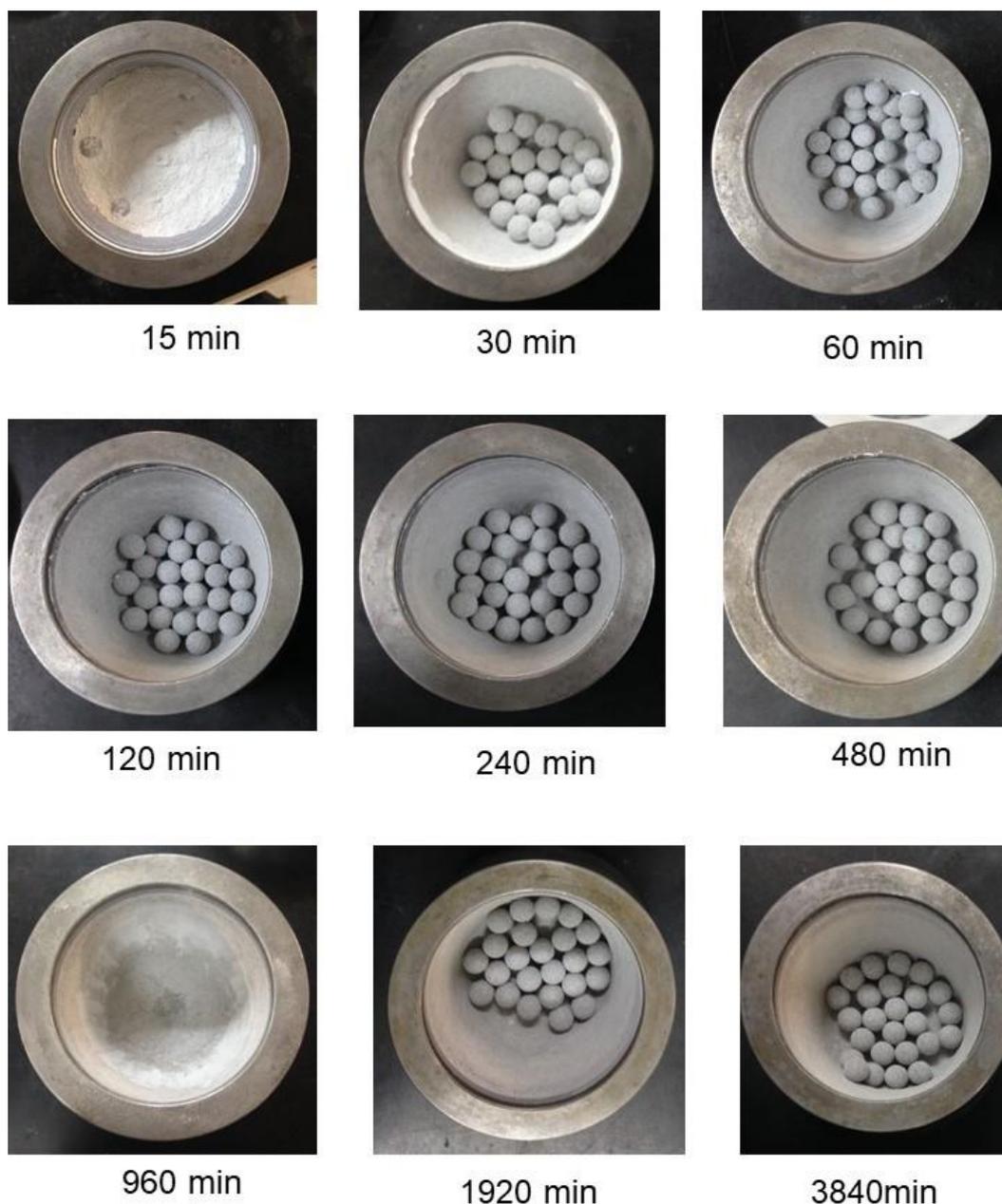
Fonte: autor

4.2 Análise qualitativa do produto da moagem

A Figura 8 apresenta as imagens características do pote, bolas e produto da moagem de calcário após tempos de moagem distintos. Para pequenos tempos (1, 2, 4, 8 e 15 minutos) os produtos da moagem apresentaram uma aparência bastante similar e a foto com o produto após 15 minutos de moagem conseguiu representar todos os pequenos tempos. Depois de 30 minutos de moagem o material começou se fixar nas paredes do pote. Para retirá-lo foi preciso usar uma espátula, mas com pouco esforço já foi possível descompactar todo o material das paredes do pote. A partir dos 60 minutos de moagem a retirada do produto foi se tornando mais trabalhosa, pois o material ficou ainda mais fixado na superfície interna do pote, sendo necessário um maior esforço para a remoção do material.

A Figura 9 apresenta as imagens características do pote, bolas e produto da moagem de dolomito após tempos de moagem distintos. Para os pequenos tempos, assim como ocorreu com o calcário, os produtos da moagem apresentaram uma aparência bem similar. Porém, o produto de moagem além de apresentar, predominantemente, partículas que foram cominuídas, também contou com a presença de partículas com a granulometria praticamente igual à da alimentação, como é possível notar na primeira imagem da Figura 9. Nos tempos de 30 e 60 minutos de moagem o material começou a compactar, moderadamente, nas paredes do pote e passando a espátula apenas uma vez foi possível remover todo o material. A partir dos 120 minutos de moagem as partículas começaram a fixar ainda mais nas paredes do pote, sendo necessária a aplicação de um maior esforço para retirar o produto de moagem.

Figura 8 - Imagens características do pote, bolas e produto da moagem de calcário após diferentes tempos de moagem.

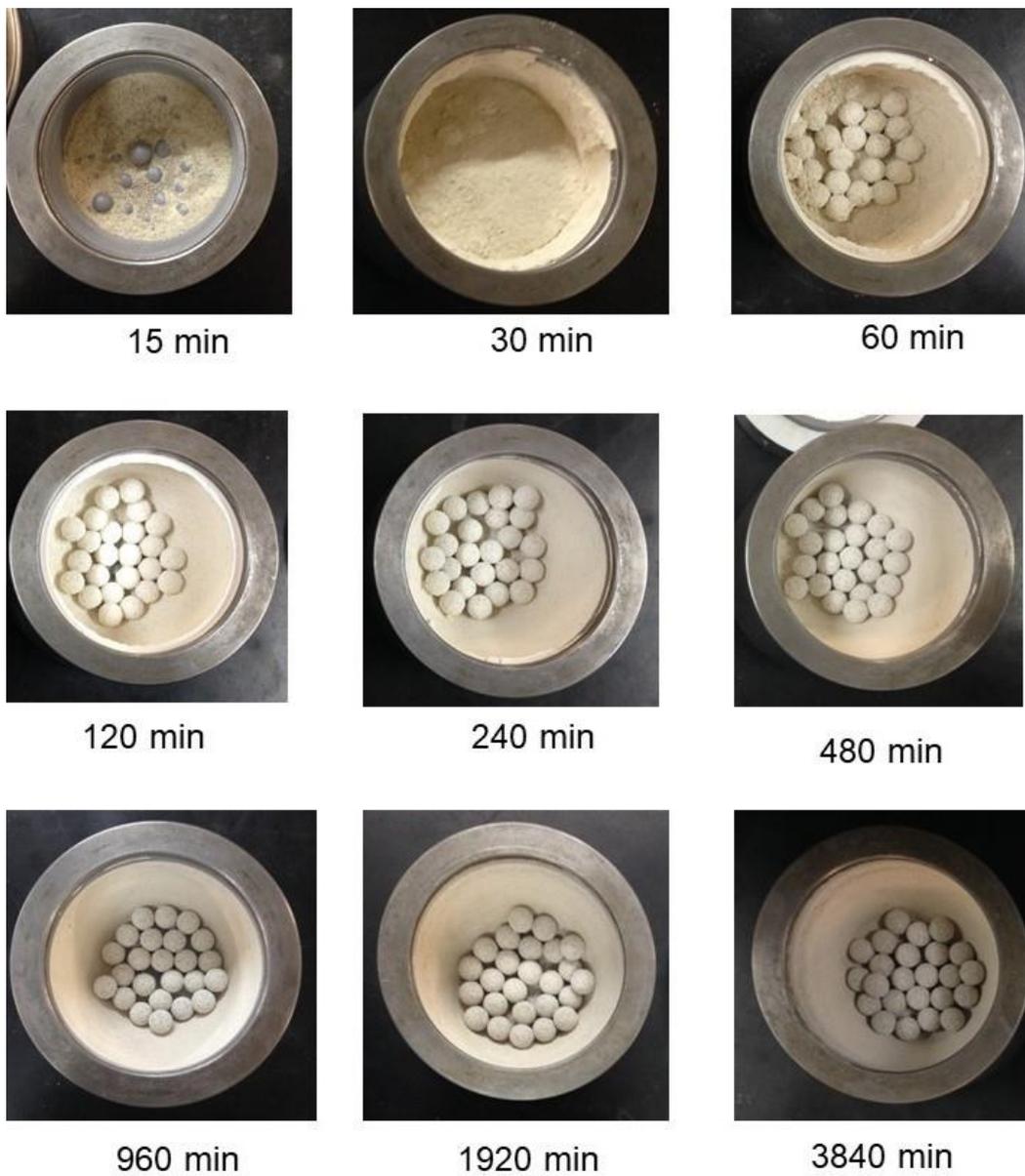


Fonte: Autor

Durante os ensaios foi possível notar que os produtos ficaram mais compactados nas paredes dos potes com o aumento do tempo de moagem. Como a remoção dos produtos tornou-se cada vez mais difícil, a perda de material ao limpar os potes cresceu gradativamente. A Figura 10 apresenta a massa perdida na limpeza dos potes em função do tempo de moagem. O produto de moagem do calcário começou fixar nas paredes do pote com 30

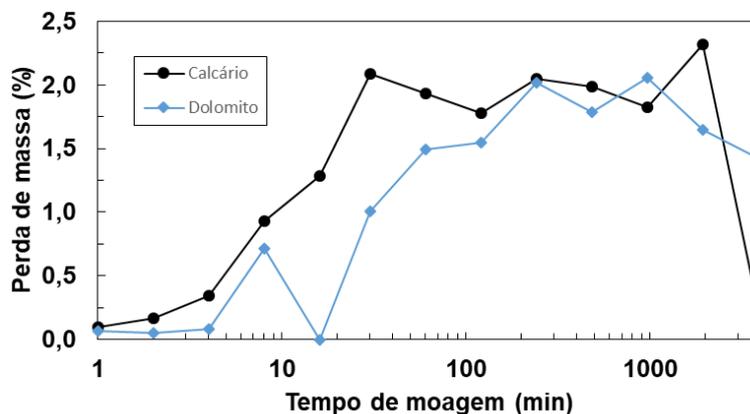
minutos e o dolomito com 60 minutos. Assim, os produtos de moagem do calcário perderam uma quantidade maior de material na limpeza, quando comparados com o dolomito. A perda de material na limpeza cresceu com o aumento do tempo até os 1920 minutos de moagem, mas diminuiu no ensaio de 3840 minutos. Percebeu-se que os produtos de moagem do ensaio de 3840 minutos foram mais fáceis de retirar do que para 1920 minutos. Os produtos de 1920 minutos foram retirados assim que acabou o ensaio, enquanto que os produtos de 3840 minutos ficaram em repouso durante 96 horas. Uma possível explicação foi que, devido a esse longo tempo de repouso, pode ter ocorrido um relaxamento das tensões existentes entre as partículas, deixando o material menos compactado e mais fácil de ser removido.

Figura 9 - Imagens características do pote, bolas e produto da moagem de dolomito após diferentes tempos de moagem.



Fonte: Autor

Figura 10 - Perda de massa na limpeza dos potes em função do tempo de moagem.



Fonte: Autor

Quando observados atentamente os produtos de moagem em diferentes tempos, nota-se alguns detalhes. Para tempos acima de 240 minutos o calcário apresentava uma camada de produto com a cor um pouco mais escura do que o material que se encontrava abaixo dela, como observa-se na Figura 11(a). Para os tempos de 30, 60 e 120 minutos as bolas utilizadas na moagem do dolomito apresentavam uma considerável camada de partículas cominuídas as envolvendo, como mostra na Figura 11(c), que foram removidas facilmente utilizando de um pincel. Para o tempo máximo de moagem (3840 minutos) as partículas cominuídas, das duas variedades de material, se fixaram nas paredes formando um tronco de cone à medida que chegava ao fundo do pote. Além de apresentar uma faixa de material, mais profunda na espessura dos corpos moedores, como mostram às Figuras 11(b) e 11(d).

Figura 11 - Imagens detalhadas da compactação das partículas ultrafinas do calcário (a) e (b), e do dolomito (c) e (d) nas paredes dos potes e nos corpos moedores.



Fonte: Autor

4.3 Análise dimensional do produto da moagem

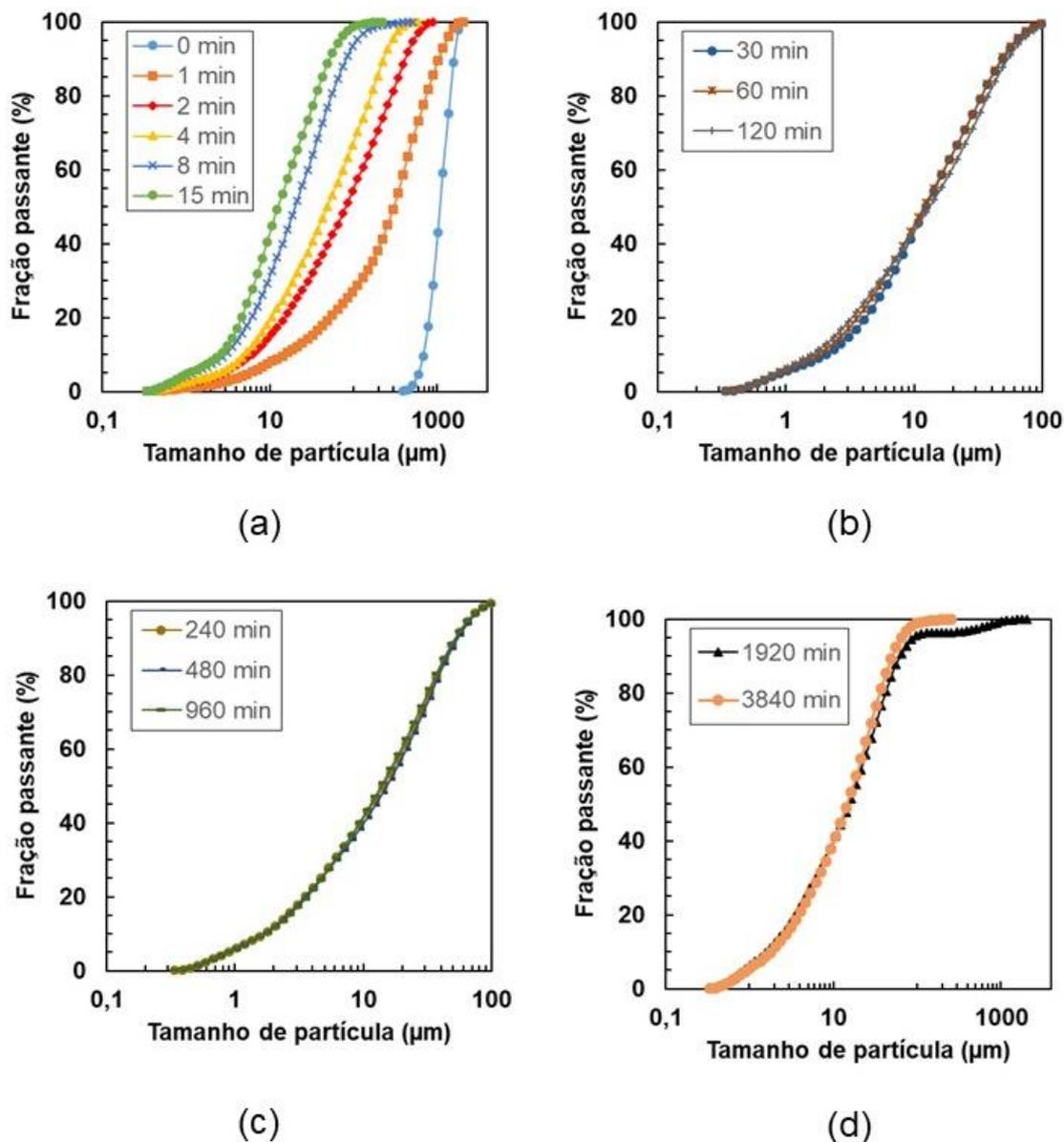
A Figura 12 apresenta as curvas características de distribuição granulométrica das alíquotas de calcário em todos os tempos de moagem. Os resultados mostraram que o aumento dos tempos de moagem provocou significativa redução dos diâmetros das partículas. Na Figura 12(a) nota-se que até 15 minutos de moagem a redução do tamanho das partículas cresce rapidamente, deslocando as curvas para a esquerda. Nas Figuras 12(b) e 12(c) observa-se que entre 30 e 960 minutos de moagem as curvas de distribuição granulométrica são bastante semelhantes, tornando difícil até mesmo identificar a qual tempo de moagem pertence cada curva. Na Figura 12(d) observa-se que a partir de 1920 minutos de moagem ocorreu uma diminuição do tamanho das partículas, as curvas se deslocam para a esquerda. Mas como essas curvas apresentaram comportamento bastante semelhantes, conclui-se que o aumento no tempo de moagem não causou redução significativa no tamanho das partículas.

A Figura 13 apresenta as curvas características de distribuição granulométrica das alíquotas dolomito para todos os tempos de moagem. Na Figura 13(a) observa-se que até 15 minutos de moagem a redução do tamanho das partículas cresce rapidamente, deslocando as curvas para a esquerda. Na

Figura 13(b) observa-se que até 120 minutos de moagem as partículas continuam reduzindo de tamanho. A Figura 13(c) mostra que a partir dos 240 minutos de moagem a granulometria começa a aumentar, as curvas de se deslocam para a direita, indicando o início da aglomeração das partículas. Na Figura 13(d) observa-se que com 1920 e 3840 minutos de moagem as partículas não diminuíram de tamanho, as curvas permaneceram similares as da Figura 13(c). E assim como ocorre com o calcário, as curvas apresentaram comportamento bastante semelhantes.

A Figura 14(a) apresenta a variação do diâmetro nominal D_{10} com o tempo de moagem. Observa-se que os valores, das duas variedades de material, são bem semelhantes e as curvas ficaram bem próximas. O aumento do tempo de moagem, até 30 minutos, provocou significativa redução no D_{10} das partículas e posteriormente os valores tendem a estabilizar.

Figura 12 - Curvas de distribuição granulométrica do calcário em cada tempo de moagem realizado neste estudo. Tempos de moagem entre 0 e 15 minutos (a), 30 e 120 minutos (b), 240 e 960 minutos (c) e 1920 e 3840 minutos (d).

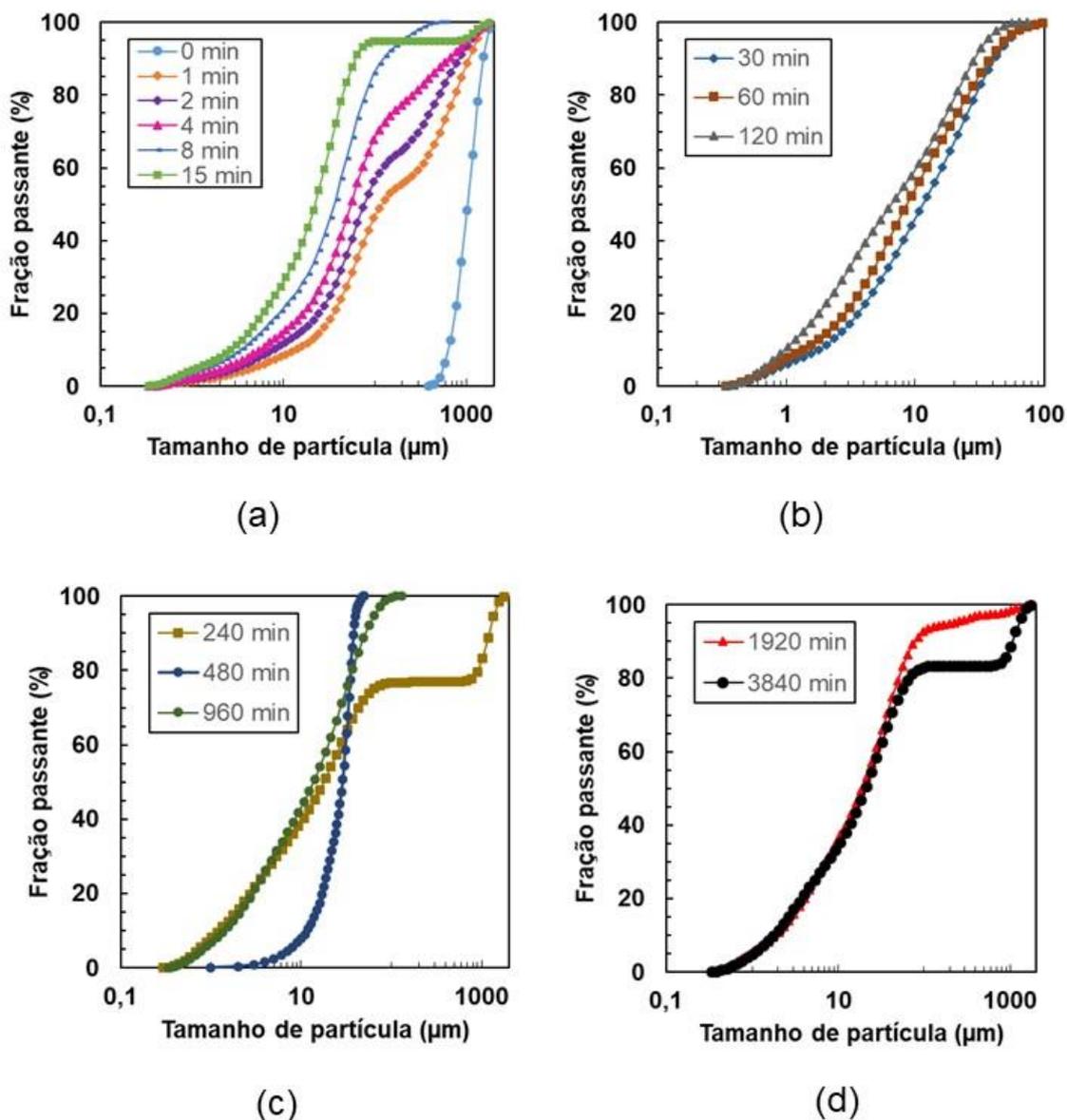


Fonte: Autor

A Figura 14(b) apresenta a variação do diâmetro médio (D_{50}) em função do tempo de moagem. A medida que o tempo de moagem aumenta o tamanho das partículas tendem a diminuir, por isso as duas curvas descrecem. Até 30 minutos de moagem o calcário apresentou um valor de D_{50} maior do que o dolomito, a partir desse ponto os valores passam a coincidir. Ao observar a figura inserida na figura 14(b), nota-se que para o dolomito o valor do D_{50} descrece até atingir seu valor mínimo aos 120 minutos de moagem. Posteriormente, o valor de D_{50} tende a aumentar, indicando o início da

aglomeração. Enquanto que o calcário manteve um valor, aproximadamente, constante de D_{50} a partir dos 15 minutos de moagem, apresentando o valor mínimo aos 60 minutos de moagem.

Figura 13 - Curvas de distribuição granulométrica do dolomito em cada tempo de moagem realizado neste estudo. Tempos de moagem entre 0 e 15 minutos (a), 30 e 120 minutos (b), 240 e 960 minutos (c) e 1920 e 3840 minutos (d).



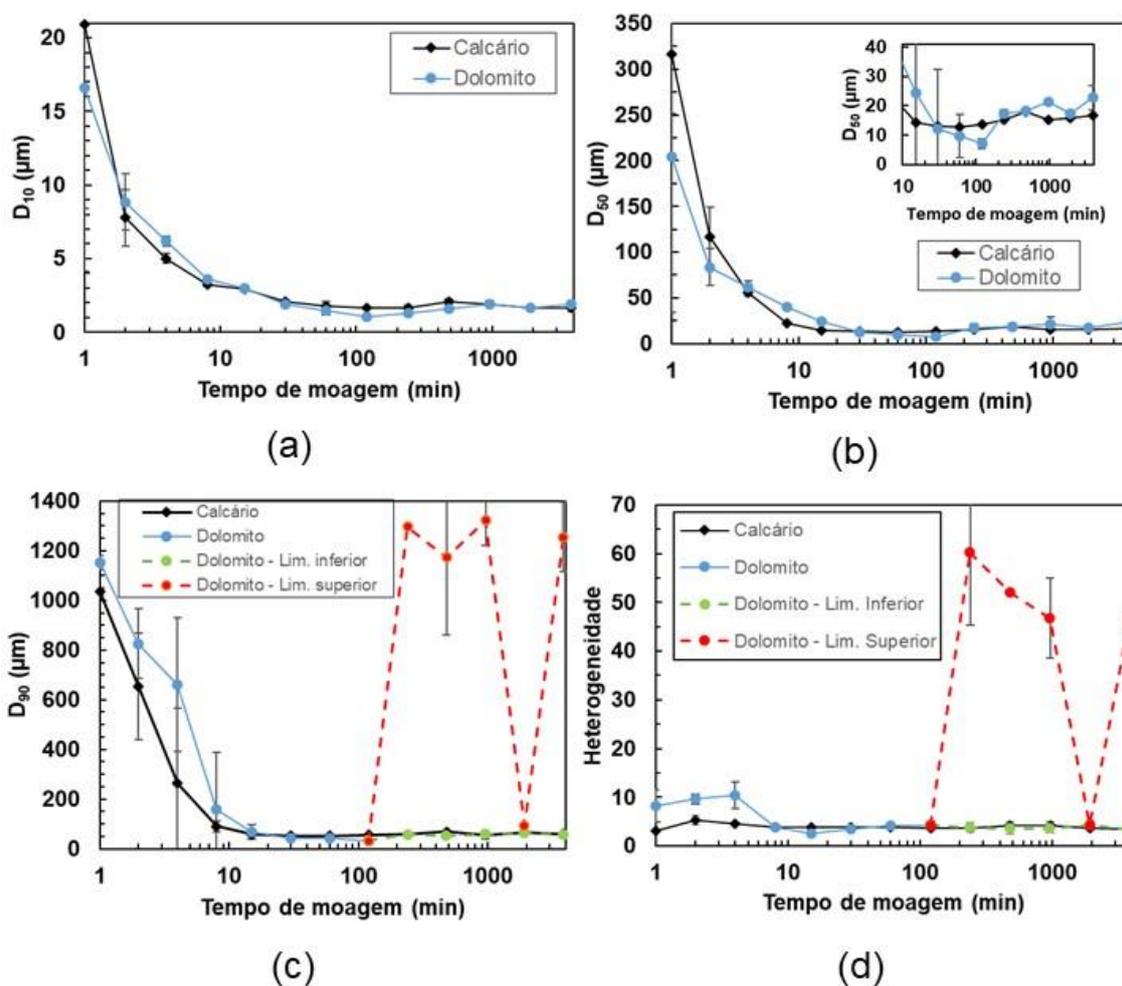
Fonte: Autor

Na Figura 14(c) observa-se a variação do D_{90} em função do tempo de moagem. O comportamento é semelhante ao que ocorre com os outros diâmetros nominais, as curvas descrecem até certo tempos de moagem e depois os valores começam a coincidir. Porém para os tempos de moagem de 240, 480, 960 e 3840 minutos o dolomito apresentou uma grande dispersão

entre os valores do D_{90} . A curva “Dolomito - Lim. Inferior” apresenta os menores valores de D_{90} encontrados e a curva mantém o comportamento anteriormente apresentado pelo dolomito. A curva “Dolomito - Lim. Superior” apresenta os maiores valores, indicando que algumas partículas aglomeraram e por isso o valor do D_{90} aumentou.

A Figura 14(d) apresenta a variação da heterogeneidade em função do tempo de moagem. Inicialmente, até 8 minutos, os valores da heterogeneidade do dolomito foram superiores aos do calcário. Posteriormente, os valores da heterogeneidade do calcário e dolomito começaram a coincidir, até 60 minutos de moagem. Após 120 minutos o dolomito apresentou uma dispersão nos valores da heterogeneidade. Os valores menores seguem a tendência apresentada anteriormente. Os valores maiores indicam que a distribuição do tamanho das partículas ficou mais dispersa.

Figura 14 - Variação do D_{10} (a), D_{50} (b), D_{90} (c) e da heterogeneidade (d) em função do tempo de moagem para o calcário e dolomito. A figura inserida em (b) mostra os valores de D_{50} entre os tempos de 10 e 3840 minutos de moagem.

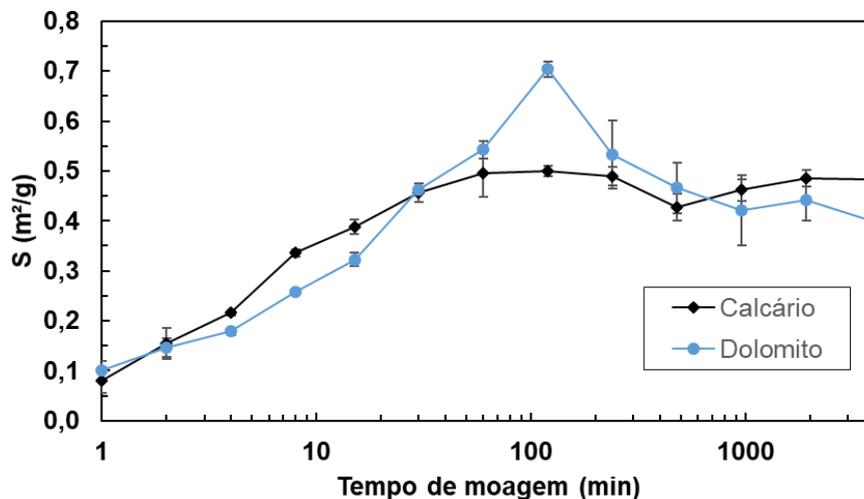


Fonte: Autor

A Figura 15 apresenta a variação da área superficial específica (S) em função do tempo de moagem. Observa-se que o avanço do tempo de moagem provocou um aumento nas áreas superficiais das duas variedades de material. No entanto, a variação da área superficial sofreu uma mudança em seu comportamento após os respectivos limites de moagem terem sido atingidos. Para o calcário o valor de S manteve-se, praticamente, constante após 60 minutos de moagem. Para o dolomito observa-se uma redução no valor de S após 120 minutos de moagem. A partir do resultado do diâmetro médio (D_{50}) e da área superficial específica (S) das partículas foi possível determinar o limite de moagem. O calcário atingiu este limite após 60 minutos de moagem, com

$D_{50}=12,85 \pm 1,37 \mu\text{m}$ e $S=0,49 \pm 0,05 \text{ m}^2/\text{g}$. Para o dolomito este limite foi alcançado após 120 minutos, com $D_{50}=7,09 \pm 0,28 \mu\text{m}$ e $S=0,70 \pm 0,01 \text{ m}^2/\text{g}$.

Figura 15 - Variação da área superficial específica (S) das partículas em função do tempo de moagem do calcário e do dolomito.

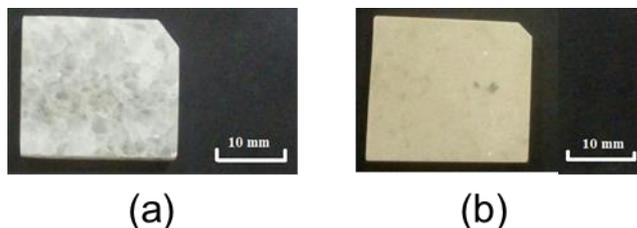


Fonte: Autor

A Figura 16 apresenta placas lapidadas de calcário e dolomito das mesmas amostras aqui estudadas. Observa-se que o dolomito apresenta uma textura fina, este é composto por grãos de pequeno tamanho. Enquanto que, o calcário apresenta grãos com tamanho maior. Além disso, sabe-se que a calcita e dolomita apresentam dureza 3 e 3,5 – 4 na escala Mohs, respectivamente. Analisando o grão, separadamente, como sendo uma partícula isolada e relacionando com a teórica de fragmentação das partículas. Sabe-se que a diminuição no tamanho das partículas, diminui também a densidade de microtrincas, tornando a cominuição mais difícil. Como o calcário apresenta tamanho de grão maior e menor dureza, essas características podem ter facilitado a fragmentação. Assim, seu limite de moagem é alcançado em um tempo menor. Para o dolomito, devido a sua textura mais fina e maior dureza, a fragmentação pode ter apresentado uma maior dificuldade para ocorrer. Assim, seu limite de moagem foi atingido com um tempo maior. Com isso, a variação observada entre os limites de moagem e a textura superficial do calcário e dolomito sugerem que os materiais apresentam diferença no comportamento de fragmentação. Porém, essa explicação só pode ser confirmada com o avanço dos estudos das propriedades mecânicas (dureza,

tenacidade à fratura) e microestruturais (tamanho de grão, população de microtrincas, quantidade total de carga superficial), que está em curso no LTM.

Figura 16 - Imagens características de placas de calcário (a) e dolomito (b) lapidadas.



Fonte: Adaptado, Pereira (2017)

4.4 Análise comparativa com corpos moedores de zircônia

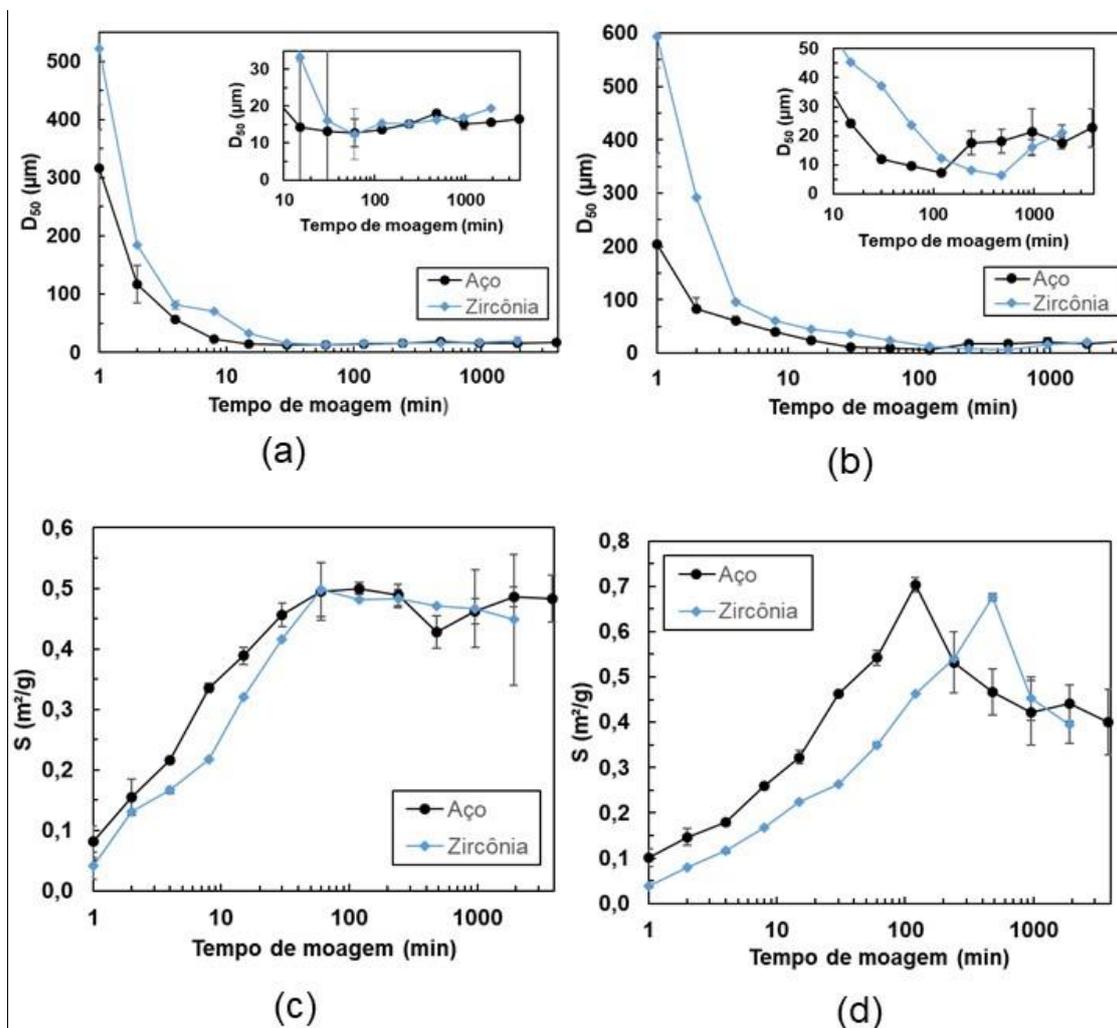
Na metodologia empregada em trabalhos anteriores (Barros, 2015; Barros 2016) os ensaios de moagem foram realizados utilizando potes e corpos moedores de zircônia, com densidade nominal de $5,7 \text{ g/cm}^3$. Para uma análise comparativa entre corpos moedores de aço e zircônia utilizaram-se dados obtidos em trabalhos anteriores (Barros, 2015; Barros, 2016) e os dados deste estudo. Com base nesses dados foram construídos gráficos comparativos.

As Figuras 17(a) e 17(b) apresentam a variação do diâmetro médio (D_{50}) em função do tempo de moagem. Inicialmente, a medida que o tempo de moagem aumenta o tamanho das partículas diminui e em razão disso as curvas descrecem. Aproximadamente após 30 minutos de moagem os valores de D_{50} , os dois tipos de corpos moedores, começaram se aproximar e as curvas estabilizaram. Observa-se que as curvas da zircônia ficaram acima das curvas do aço antes da estabilização, indício de que utilizando corpos moedores de aço a redução do tamanho das partículas é maior do que com zircônia.

As Figuras 17(c) e 17(d) apresentam a variação da área superficial específica (S) em função do tempo de moagem. Observa-se que o valor das áreas superficiais cresceram com o aumento do tempo, até atingirem os limites de moagem. Como as curvas referentes à zircônia se mantêm abaixo das curvas do aço, percebe-se utilizando corpos moedores de aço foram produzidas partículas com um menor tamanho e assim maior área superficial do que com bolas de zircônia. Na Figura 17(c) observa-se que o calcário

atingiu os maiores valores de área superficial aos 60 minutos de moagem, para os dois tipos de corpos moedores. Enquanto que o dolomito apresentou os maiores valores de área superficial em tempos de moagem diferentes. Utilizando corpos moedores de aço, o dolomito atingiu o limite de moagem após 120 minutos e, com a zircônia, após 480 minutos de moagem.

Figura 17 - Variação do D_{50} e da área superficial específica (S) em função do tempo de moagem, relacionando as variedades de material dos corpos moedores empregados. As figuras (a) e (c) apresentam as variações entre os corpos moedores para o calcário. As figuras (b) e (d) mostram essas variações para o dolomito.



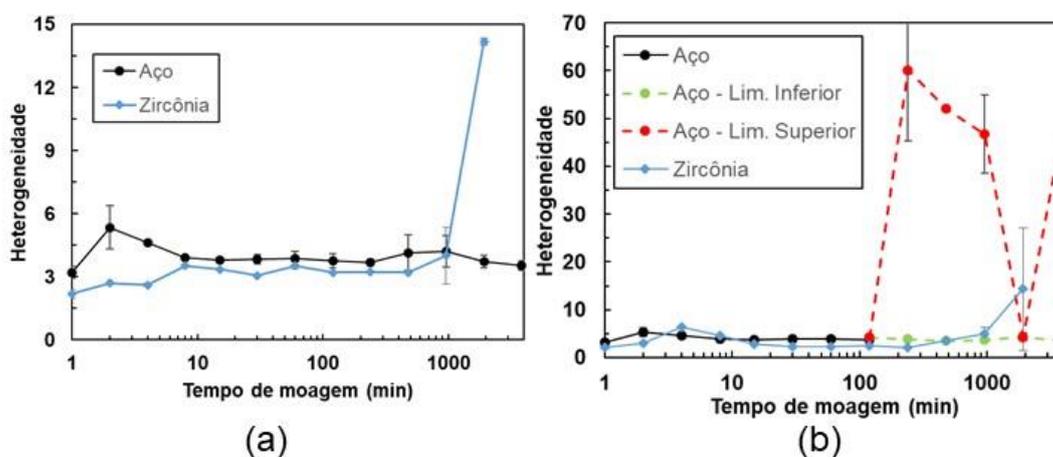
Fonte: Autor

As Figuras 18(a) e 18(b) apresentam a variação da heterogeneidade da distribuição de tamanhos em função do tempo de moagem. Na Figura 18(a) observa-se que, com a utilização de corpos moedores de aço, a heterogeneidade do calcário foi maior. Na Figura 18(b) verifica-se que nos

ensaios de moagem do dolomito os valores da heterogeneidade, tanto para corpos moedores de aço como para os de zircônia, foram próximos até os 120 minutos de moagem. Posteriormente a curva referente a zircônia segue a tendência apresentada anteriormente. Enquanto que na moagem com corpos moedores de aço a heterogeneidade apresentou uma dispersão nos valores. Para uma melhor análise dos dados encontrados, foram contruídas duas curvas. A curva “Lim. Inferior” apresenta os menores valores encontrados e a curva “Lim. Superior” os maiores valores.

O efeito da aglomeração no calcário foi observado após 60 minutos de moagem, ao utilizar as duas naturezas de corpos moedores. No dolomito esse efeito foi observado após 120 minutos utilizando corpos moedores de aço e após 480 minutos com zircônia. Ao comparar o calcário e dolomito, observou-se que o dolomito apresentou uma aglomeração mais intensa, principalmente nos ensaios utilizando corpos moedores de aço. Uma possível explicação foi que devido ao dolomito alcançar o limite de moagem com um tamanho de partícula menor, a carga superficial total foi maior e gerou aglomerados mais resistentes. Fato que foi refletido a partir dos ensaios de análise granulométrica.

Figura 18 - Variação da heterogeneidade em função do tempo de moagem, relacionando as variedades de material dos corpos moedores empregados. A figura (a) apresenta a variação entre os corpos moedores para o calcário. A figura (b) mostra essa variação para o dolomito.



Fonte: Autor

A partir da Eq. (1) é possível relacionar a energia de impacto das bolas com a densidades das mesmas. Sabe-se que a densidade do aço é maior que a da zircônia, conseqüentemente a energia de impacto também é maior. Sendo assim, as bolas de aço transferem uma maior energia mecânica ao colidirem com as partículas e, teoricamente, provocam uma maior fragmentação. A Tabela 5 apresenta uma caracterização do limite de moagem do calcário e dolomito utilizando corpos moedores de aço e zircônia. Observa-se que o dolomito chegou ao limite de moagem em tempos diferentes, utilizando corpos moedores de aço este limite foi alcançado em um tempo menor de moagem. Porém, o calcário atingiu estes limites com o mesmo tempo de moagem, para as duas naturezas de corpos moedores. Assim, percebe-se que a natureza dos corpos moedores afeta a fragmentação do dolomito de forma significativa, mas não apresenta efeito aparente na fragmentação do calcário. Então, foi possível concluir que a fragmentação das partículas não pode ser avaliada apenas em relação a natureza dos corpos moedores, pois parece depender também da natureza do material cominuído.

Tabela 5 - Caracterização do limite de moagem do calcário e do dolomito utilizando corpos moedores de aço e de zircônia.

	Calcário		Dolomito	
	Aço	Zircônia	Aço	Zircônia
D₅₀ (µm)	12,85 ± 1,37	12,33 ± 0,58	7,09 ± 0,28	6,35 ± 0,09
Tempo (min)	60	60	120	480
S (m²/g)	0,49 ± 0,05	0,49 ± 0,04	0,70 ± 0,01	0,68 ± 0,01
Ht	3,87 ± 0,34	3,53 ± 0,16	4,26 ± 0,02	3,52 ± 0,08

Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados encontrados neste estudo é possível concluir que a moagem ultrafina provocou significativa redução no tamanho das partículas, até alcançar o limite de moagem. Posteriormente, o aumento nos diâmetros médios evidenciou a formação de aglomerados.

A partir do resultado do diâmetro médio (D_{50}) e da área superficial específica (S) das partículas foi possível determinar o limite de moagem. O calcário atingiu este limite após 60 minutos de moagem, com diâmetro médio limite de $12,85 \pm 1,37 \mu\text{m}$ e $12,33 \pm 0,58 \mu\text{m}$ utilizando corpos moedores de aço e zircônia, respectivamente. Porém, o dolomito alcançou estes limites após tempos de moagem distintos, ao utilizar corpos moedores das duas naturezas. Utilizando bolas de aço o limite de moagem foi atingido após 120 minutos, com diâmetro médio limite de $7,09 \pm 0,28 \mu\text{m}$. Ao utilizar corpos moedores de zircônia este limite foi alcançado após 480 minutos de moagem, com diâmetro médio limite de $6,35 \pm 0,09 \mu\text{m}$.

Comparando as duas variedades de material utilizados nos ensaios de moagem, verificou-se que o dolomito apresentou maior resistência à fragmentação. Assim, necessitou de mais energia para reduzir o tamanho das partículas, fato que também foi observado na preparação das amostras. A variação observada entre os limites de moagem e a textura microestrutural do calcário e dolomito sugerem que os materiais apresentam diferença no comportamento de fragmentação.

Assim, observou-se que o dolomito mostrou significativa diferença, nos ensaios de moagem, ao utilizar corpos moedores de aço. Pois conseguiu alcançar o limite de moagem 6 horas antes do que quando foram utilizadas bolas de zircônia. Visto que o processo de moagem apresenta alto consumo de energia, poupar 6 horas de funcionamento do moinho proporcionaria uma relevante economia nos gastos. Após a análise de todos os resultados, foi possível concluir que o processo de fragmentação das partículas deve ser avaliado em função da natureza dos corpos moedores e do material a ser cominuído.

REFERÊNCIAS

- BARROS, FBM. 2015 **Moagem ultrafina do calcário em moinho planetário de bolas: influência de parâmetros operacionais sobre o tamanho, a morfologia e a cristalinidade das partículas cominuídas**. Relatório de Final de Iniciação Científica, PIBIC-FACEPE, 25p.
- BARROS, FBM. 2016. **Efeito do tamanho de partícula na decomposição térmica de calcário metamórfico e sedimentar**. Monografia em Engenharia de Minas, UFPE.
- BURMEISTER, C. F.; KWADE, A. **Process engineering with planetary ball mills**. Chem. Soc. Rev. , 42, 2013.
- CABRAL, AJO; OGASAWARA, T; TAVARES, LM. 2001. **Preparação de óxido de ferro sub-micrométrico para aplicação em cerâmicas magnéticas por moagem de alta energia**, REVISTA Materia, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, pp. 1-7.
- FIGUEIRA, H. V.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Britagem e moagem**. In: Tratamento de minérios, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.4. p.143-210.
- GUZZO PL; SANTOS JB; DAVID, RC. 2014. **Particle size distribution and structural changes in limestone ground in planetary ball mill**. Int J Miner Process v 126, 41-48
- GUZZO, P. L.; TINO, A. A. A.; SANTOS, J. B. 2015 **The onset of particle agglomeration during the dry ultrafine grinding of limestone in a planetary ball mill**. Powder Technology, [s.l.], v. 284, p.122-129. Elsevier BV.
- KING, R. P. **Comminution operations**. In: KING, R. P. Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems. 1ª. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2001. Cap. 5, p. 127-212.
- LINS, F. A.F. (2007). **Cimento**. **Anuário Estatístico, 2007**, Setor de Transformação de Não-Metálicos. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM, Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral – DTTM/MME - Ministério de Minas e Energia – MME, p. 25-33.
- LUZ, A. B. (1998). **Estudo de Oxidação e Redução de Ferro Contido em Caulins**. Tese de Doutorado em Engenharia Mineral, EPUSP.
- MIO, H; KANO, J; SAITO, F; 2004. **Scale-up method of planetary ball mill**. Chem. EngineeringSci. 59, pp.5909-5916

PEREIRA, U.P.H (2017). **Determinação da dureza e tenacidade à fratura de calcário por indentação estática: subsídios para análise do processo de moagem ultrafina.** Relatório de Particular de Iniciação Científica, PIBIC-FACEPE.

SAMPAIO JA, ALMEIDA SLM. 2008. **Calcário e dolomito** In: Luz AB, Lins FAF (ed) Rochas e minerais industriais: usos e especificações 2 ed, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p 363-387.

SANTOS, J. B. (2016). **Aplicação de modelos cinético e energético para análise da fragmentação ultrafina de partículas de calcário e quartzo em moinho planetário de bolas.** Dissertação de mestrado em Engenharia Mineral, UFPE.

SINTON, CW. 2006. **Raw Materials for Glass and Ceramics: Sources, Processes and Quality Control** John Wiley& Sons, Inc New Jersey p63-87.

TINO, A.A.A. (2016). **Moagem ultrafina de gipsita em moinho planetário de bolas: caracterização dimensional, morfológica e estrutural do estado particulado.** Dissertação de mestrado em Engenharia Mineral, UFPE.

WELLENKAMP FJ. 1999. **Moagem Fina e Ultrafina de Minerais Industriais: Uma Revisão Série Tecnologia Mineral** vol 75, CETEM/MCT, 55p.