



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

MATEUS LEAL IDELFONSO

**MOAGEM ULTRAFINA DE GIPSITA EM MOINHOS A JATO E PLANETÁRIO:  
UM ESTUDO COMPARATIVO**

Recife

2023

MATEUS LEAL IDELFONSO

**MOAGEM ULTRAFINA DE GIPSITA EM MOINHOS A JATO E PLANETÁRIO:  
UM ESTUDO COMPARATIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador (a): Pedro Luiz Guzzo

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através  
do programa de geração automática do SIB/UFPE

Idelfonso, Mateus Leal.

Moagem Ultrafina de Gipsita em Moinhos a Jato e Planetário: Um Estudo  
Comparativo / Mateus Leal Idelfonso. - Recife, 2023.

41 p.

Orientador(a): Pedro Luiz Guzzo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Minas -  
Bacharelado, 2023.

1. aglomeração. 2. alabastro. 3. difração de raios X. 4. distribuição  
granulométrica. 5. gipsita Johnson. 6. hábito cristalino. I. Guzzo, Pedro Luiz.  
(Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

MATEUS LEAL IDELFONSO

**MOAGEM ULTRAFINA DE GIPSITA EM MOINHOS A JATO E PLANETÁRIO:  
UM ESTUDO COMPARATIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovado em: 29/09/2023

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Pedro Luiz Guzzo  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Áureo Octavio Del Vecchio Machado  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Me. Filipe Brito Marinho de Barros  
Universidade Federal de Pernambuco

## **DEDICATÓRIA**

*In memoriam*

**As minhas avós Ana Maria e Sebastiana.**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter nutrido o meu lado espiritual diariamente para a realização dessa conquista pessoal.

Aos meus pais Napoleão Idelfonso e Liz Angela Leal por todo apoio, carinho e amor fornecidos ao longo de toda minha vida. Vocês são meu “ouro de mina”, como diria o cantor Djavan. Também agradeço ao meu irmão Miguel Idelfonso pela nossa irmandade e união desde o ano de 2003.

Ao professor Pedro Guzzo pela oportunidade, amizade e confiança para a realização das pesquisas científicas. Ademais, agradeço também por ter me orientado e incentivado ao longo de outras etapas da graduação.

Ao, hoje, professor Filipe Brito por toda paciência, cuidado e zelo em sempre transmitir todo o conhecimento acadêmico durante o período que fui bolsista de iniciação científica.

A minha ex-namorada Elaine Fernanda por todo amor e companheirismo destinado durante três anos da minha graduação.

Aos amigos graduandos que tornaram a jornada da graduação mais leve. Menção honrosa aos amigos Paulo Henrique e Vinicius Oliveira.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas pelas aulas ministradas.

Aos integrantes do Grupo de Tecnologia Mineral por todo apoio e orientação científica. Destino uma menção honrosa à Fania Caicedo, Felipe Martins, Marcelo Gomes e Marcos David pela incomensurável colaboração e apoio para a realização deste trabalho.

Aos demais amigos que passaram pela minha vida e criaram ótimos momentos na lembrança. Em especial, Cássio Vinicius, Caio Alencar, Rodrigo Eduardo, Abinadi Staniscia e Augusto Paiva.

Ao meu primo Daniel Idelfonso por ter sido minha referência em sempre correr atrás dos seus sonhos. Por fim, agradeço a todos os meus familiares que em breve terão o primeiro engenheiro de minas da família.

## RESUMO

A gipsita é um mineral industrial amplamente utilizado na indústria civil e na agricultura em granulometria fina ( $< 100 \mu\text{m}$ ) ou ultrafina ( $< 10 \mu\text{m}$ ). Para atingir granulometria ultrafina é necessário o uso de moinhos de alta energia que apresentam como limitantes o alto consumo de energia, a aglomeração de partículas e as modificações estruturais. Por isso, a escolha do moinho apropriado é essencial para assegurar uma viabilidade econômica na rota de processamento da gipsita. No Polo Gesseiro do Araripe (PGA), a variedade de gipsita *Johnson* é utilizada como minério. Enquanto a variedade alabastro não vem sendo aplicada industrialmente devido ao seu hábito fibroso. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi investigar a influência de mecanismos operacionais dos moinhos de alta energia a jato e planetário sobre a distribuição granulométrica e possíveis modificações estruturais resultantes na produção de ultrafinos de gipsita *Johnson* e alabastro. Para isso, alíquotas foram preparadas e classificadas em três faixas de alimentação distintas compreendidas entre 53 e 150  $\mu\text{m}$ . Os ensaios de moagem foram realizados variando a taxa de alimentação no moinho a jato e o tempo de moagem no moinho planetário de bolas. Para realizar uma análise comparativa foi adotado um método de equivalência entre tempo de moagem e taxa de alimentação. Após os ensaios, as alíquotas foram caracterizadas por análises dimensionais (tamanho de partícula), morfológicas (microscopia eletrônica de varredura) e estruturais (difração de raios X). As distribuições dos tamanhos mostraram que a moagem em moinho a jato alcançou granulometria ultrafina para todas as faixas. Para o moinho planetário, as alíquotas moídas em tempos prolongados sofreram um aumento do diâmetro médio de partículas ( $d_{50}$ ). Do ponto de vista estrutural, os picos de difração das alíquotas cominuídas em moinho planetário apresentaram uma maior redução de intensidade e aumento da largura à meia altura (FWHM) quando comparados aos picos das alíquotas cominuídas em moinho a jato. Referentes as análises morfológicas, as alíquotas de alabastro cominuídas em moinho planetário sofreram significativa influência da aglomeração. Portanto, o moinho a jato se mostrou um moinho de alta energia recomendado para a produção partículas ultrafinas de gipsita.

**Palavras-chave:** aglomeração; alabastro; difração de raios x; distribuição granulométrica; gipsita *johnson*; hábito cristalino.

## ABSTRACT

Gypsum is an industrial mineral widely used in the civil industry and agriculture in fine ( $< 100 \mu\text{m}$ ) or ultrafine ( $< 10 \mu\text{m}$ ) particle sizes. To achieve ultrafine particle size, it is necessary to use high-energy mills, which are limited by high energy consumption, particle agglomeration and structural modifications. Therefore, choosing the appropriate mill is essential to ensure economic viability in the gypsum processing route. At the Polo Gesseiro do Araripe (PGA), the Johnson gypsum variety is used as ore. While the alabaster variety has not been applied industrially due to its fibrous habit. In this context, the objective of this study was to investigate the influence of operational mechanisms of high-energy jet and planetary mills on particle size distribution and possible structural modifications resulting in the production of ultrafine Johnson gypsum and alabaster. For this, aliquots were prepared and classified into three distinct feeding ranges between 53 and 150  $\mu\text{m}$ . The grinding tests were carried out by varying the feed rate in the jet mill and the grinding time in the planetary ball mill. To carry out a comparative analysis, a method of equivalence between grinding time and feeding rate was adopted. After the tests, the aliquots were characterized by dimensional (particle size), morphological (scanning electron microscopy) and structural (X-ray diffraction) analyses. The size distributions showed that jet mill grinding achieved ultrafine particle size for all ranges. For the planetary mill, the aliquots ground over prolonged times suffered an increase in the average particle diameter ( $d_{50}$ ). From a structural point of view, the diffraction peaks of the aliquots comminuted in a planetary mill showed a greater reduction in intensity and increase in width at half height (FWHM) when compared to the peaks of the aliquots comminuted in a jet mill. Regarding morphological analyses, the alabaster aliquots comminuted in a planetary mill suffered a significant influence from agglomeration. Therefore, the jet mill proved to be a recommended high-energy mill for producing ultrafine gypsum particles.

**Keywords:** agglomeration; alabaster; X-ray diffraction; particle size distribution; gypsum Johnson; crystalline habit.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Célula unitária cristalina da gipsita. ....	13
Figura 2 - Detalhamento do moinho a jato tipo espiral.....	16
Figura 3 - Representação de funcionamento do moinho planetário e seus componentes: os movimentos de revolução e rotação (a) e trajetórias dos corpos moedores no interior do pote (b). ....	17
Figura 4 - Blocos de gipsita (a) <i>Johnson</i> e (b) alabastro empregados.....	19
Figura 5 - Moinho vibratório (a), detalhe da câmara de moagem (b) e almofariz (c) empregados. ....	20
Figura 6 - Equipamentos utilizados: alimentador (a); compressor (b) e detalhes do moinho (c). ....	24
Figura 7 - Moinho planetário de bolas, potes e esferas de zircônia empregados neste estudo. ....	25
Figura 8 - Interface do programa EVA para obtenção do FWHM dos planos cristalográficos no difratograma de raios X das amostras.....	29
Figura 9 - Curvas de distribuição granulométrica da alimentação e do material moído das faixas 105x150 $\mu\text{m}$ ; 75x105 $\mu\text{m}$ e 53x75 $\mu\text{m}$ de gipsita. ....	30
Figura 10 - Curvas de distribuição granulométrica da alimentação (0 min) e do material moído com seus respectivos tempos das faixas 105x150 $\mu\text{m}$ ; 75x105 $\mu\text{m}$ e 53x75 $\mu\text{m}$ de gipsita <i>Johnson</i> (a) e alabastro (b).....	32
Figura 11 - Curvas de distribuição granulométrica da alimentação (0 min) e dos materiais moídos em tempos de 15 min e 100 min na faixa 105x150 $\mu\text{m}$ de gipsita <i>Johnson</i> (a) e alabastro (b) e de alabastro para os tempos de 15 min e 330 min na faixa 105x150 $\mu\text{m}$ (c) e na faixa 38x75 $\mu\text{m}$ (d).....	32
Figura 12 - Curvas de distribuição granulométrica de gipsita alabastro referentes à alimentação (0 min) e aos materiais moídos em tempos de 15 min e 330 min nas faixas 75x105 $\mu\text{m}$ e 38x75 $\mu\text{m}$ . ....	33
Figura 13 - Diâmetro médio de partículas na faixa de 105x150 $\mu\text{m}$ de gipsita <i>Johnson</i> (a) e alabastro (b) em função do tempo de moagem para as alíquotas moídas nos moinhos planetário e a jato. ....	35
Figura 14 - Heterogeneidade da distribuição de gipsita <i>Johnson</i> (a) e alabastro (b) na faixa de 105x150 $\mu\text{m}$ em função do tempo de moagem para as alíquotas moídas nos moinhos planetário e a jato. ....	36
Figura 15 - Imagens de MEV das alíquotas de alimentação e do produto das moagens de gipsita alabastro em moinhos planetário de bolas (a-c) e a jato (d-f). ....	36
Figura 16 - Difratogramas de raios X da alimentação e das amostras moídas em moinho planetário e moinho e a jato de gipsita <i>Johnson</i> (a) e alabastro (b).....	37
Figura 17 - FWHM relativo à alimentação de gipsita <i>Johnson</i> (a) e alabastro (b) nos moinhos a jato e planetário durante 15 e 100 min. ....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reclassificação granulométrica dos produtos das britagens dos blocos de gipsita.	19
Tabela 2 - Parâmetros operacionais empregados nos ensaios de moagem em moinho vibratório. .....	21
Tabela 3 - Classificação granulométrica final das partículas de gipsita após a preparação de alíquotas para os ensaios de moagem ultrafina em moinho a jato.....	21
Tabela 4 – Classificação granulométrica das amostras de gipsitas remanescentes. ....	22
Tabela 5 – Classificação granulométrica final da etapa de preparação de alíquotas para os ensaios de moagem ultrafina em moinho planetário. ....	23
Tabela 6 – Valores médios de alimentação da gipsita no novo sistema.....	23
Tabela 7 – Tempos de moagem empregados nos ensaios em moinho planetário. ....	26
Tabela 8 - Programação adotada para realização dos ensaios de moagem ultrafina em moinho planetário. ....	26
Tabela 9 – Planos cristalinos, ângulos de difração ( $2\theta$ ) e os espaçamentos interplanares ( $d_{hkl}$ ) dos respectivos picos de difração selecionados para avaliação das modificações estruturais da gipsita. ....	29
Tabela 10 – Valores médios dos diâmetros característicos, da heterogeneidade da distribuição e da área superficial específica das alíquotas moídas de gipsita em moinho a jato. ....	31
Tabela 11 – Valores médios dos diâmetros característicos das alíquotas moídas de gipsita em moinho planetário. ....	34

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Estrutura e propriedades da gipsita .....	13
2.2	Fundamentos da moagem ultrafina .....	14
2.3	Moinho a jato: princípio de funcionamento e variáveis operacionais.....	15
2.4	Moinho Planetário: princípio de funcionamento e variáveis operacionais .....	16
2.5	Moagem ultrafina de gipsita.....	17
3.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	18
3.1	Procedência das amostras .....	19
3.2	Preparação de alíquotas para o moinho a jato .....	19
3.3	Preparação de alíquotas para o moinho planetário .....	22
3.4	Ensaio de moagem ultrafina em moinho a jato.....	23
3.5	Ensaio de moagem ultrafina em moinho planetário .....	24
3.6	Análises granulométricas e morfológicas.....	27
3.7	Caracterização estrutural das partículas .....	28
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	29
4.1	Moinho a jato: distribuição granulométrica e diâmetros característicos.....	29
4.2	Moinho planetário: distribuição granulométrica e diâmetros característicos.....	31
4.3	Análise comparativa entre os produtos das moagens.....	34
4.4	Análise estrutural dos produtos das moagens.....	37
5.	CONCLUSÃO.....	38
	REFERÊNCIAS .....	40

## 1. INTRODUÇÃO

A gipsita é um mineral industrial que possui como característica a possibilidade de sofrer desidratação e reidratação. Após redução granulométrica, a gipsita *in natura* é geralmente utilizada como corretivo de solo agrícola. A forma calcinada ou gesso possui importante aplicação nos setores da construção civil. As mineradoras localizadas na região do Polo Gesseiro do Araripe (PGA) que compreende os municípios pernambucanos de Araripina, Bodocó, Ipubi, Ouricuri e Trindade são responsáveis por aproximadamente 90% produção nacional do mineral. As variedades encontradas no PGA são conhecidas como: cocadinha, *Johnson*, alabastro, estrelinha e selenita. A cocadinha possui hábito estratificado. A variedade alabastro apresenta cristais radiados em forma de estrela. A *Johnson* é a que apresenta maior grau de pureza e possui hábito granular. Essa variedade produz o gesso tipo alfa que é amplamente empregado para a confecção de materiais ortodônticos e ortopédicos. A alabastro tem alta pureza mas é considerada um estéril devido ao seu hábito fibroso que promove uma anisotropia, a qual desenvolve crepitação nas operações de beneficiamento e calcinação que ainda não foram devidamente ajustadas para a produção de gesso de boa qualidade. Enquanto a variedade selenita é bem cristalizada e incolor (Baltar, Bastos e Luz, 2008; Oliveira *et al*, 2012; Tino, 2016).

A gipsita pode ser moída em granulometria fina ( $< 100 \mu\text{m}$ ) e ultrafina ( $< 10 \mu\text{m}$ ). A utilização de minerais industriais depende da pureza e do controle do tamanho e da morfologia das partículas. Para produção de material ultrafino é necessário utilizar um moinho de alta energia. Porém, a moagem ultrafina apresenta como principais restrições o elevado consumo energético e a dificuldade de obtenção de ultrafinos em moagens prolongadas devido a interação interpartículas que pode resultar em aglomeração e proporcionar o aumento no tamanho de partícula (Wellenkamp, 1999; Guzzo, Santos e Tino, 2015; Tino, 2016). Estudos de moagem ultrafina de minerais e rochas industriais de ocorrência no nordeste brasileiro vêm sendo desenvolvidos no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM/UFPE) para caracterização do tamanho e da morfologia de partícula em função de parâmetros operacionais e para investigar as modificações estruturais, como a perda de cristalinidade, a deformação plástica e a geração de defeitos, induzidas por tempos prolongados de moagem (Guzzo, Santos e Tino, 2015; Guzzo e Barros, 2019; Guzzo *et al*, 2020).

Desta maneira, o objetivo desse trabalho consiste em realizar um estudo comparativo da moagem de alta energia de gipsita *Johnson* e alabastro em moinhos a jato e planetário para faixas granulométricas de alimentação compreendidas entre 53 e 150  $\mu\text{m}$  com o intuito de

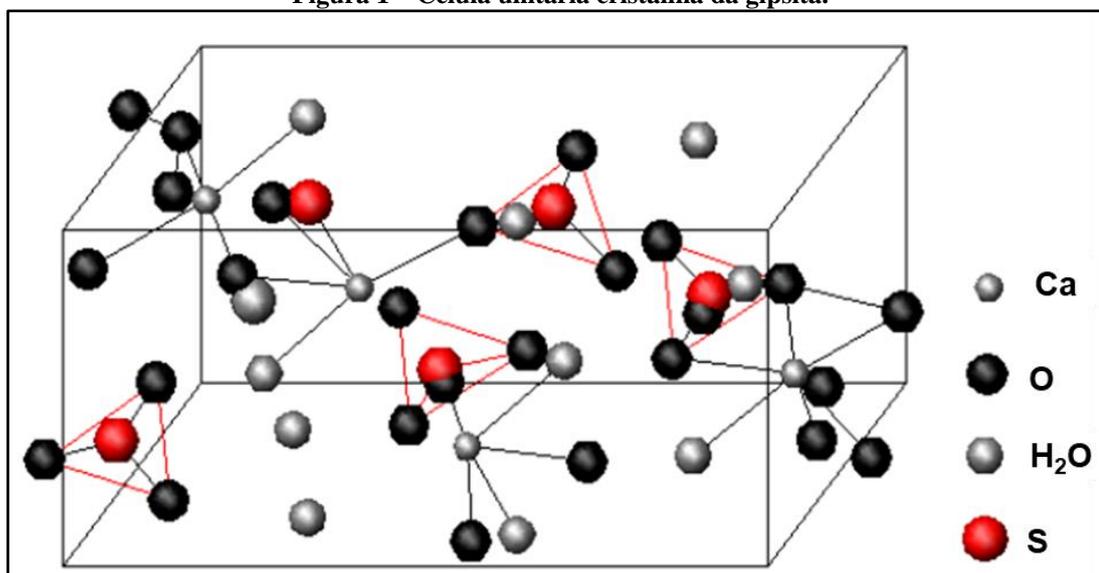
compreender a influência de mecanismos operacionais dos moinhos sobre a distribuição granulométrica e possíveis modificações estruturais resultantes na produção de ultrafinos, podendo assim contribuir para um possível emprego em escala industrial da alabastro.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estrutura e propriedades da gipsita

O mineral gipsita é um sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que possui em sua composição química os seguintes percentuais: 32,5% de  $\text{CaO}$ , 46,6%  $\text{SO}_3$  e 20,9% de  $\text{H}_2\text{O}$ . A cristalização acontece no sistema monoclinico, o grupo espacial é o  $C2/c$  e a classe de simetria é a  $2/m$ . A célula unitária da gipsita é cúbica de face centrada (CFC), constituída por quatro grupos aniônicos  $\text{SO}_4^{2-}$  em forma de tetraedro, quatro íons  $\text{Ca}^{2+}$  e oito moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ . A Figura 1 apresenta uma imagem esquematizada da célula unitária da gipsita. À temperatura ambiente, os eixos cristalográficos apresentam as seguintes dimensões:  $a = 6,284 \text{ \AA}$ ,  $b = 15,200 \text{ \AA}$  e  $c = 5,405 \text{ \AA}$  e valores dos ângulos internos:  $\alpha = \gamma = 90^\circ$  e  $\beta = 113,83^\circ$ . A estrutura interna é composta por pares de camadas adjacentes (1:1), perpendiculares ao plano (010) formadas por  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ . Entre essas camadas estão presentes as moléculas  $\text{H}_2\text{O}$ , paralelas ao plano (010). As moléculas de água estão ligadas quimicamente por pontes de hidrogênio com os oxigênios do grupo sulfato. Cada íon  $\text{Ca}^{2+}$  está coordenado a seis oxigênios de grupos tetraédricos de  $\text{SO}_4^{2-}$  e a duas moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  (Baltar, Bastos e Luz, 2008; Klein e Dutrow, 2012).

Figura 1 – Célula unitária cristalina da gipsita.



Fonte: Canut, 2006.

Devido à existência da fraca ligação química entre as moléculas de água e os sulfatos e a distância entre as camadas formadas por  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , há a possibilidade de mover as moléculas de água a temperaturas inferiores a 200 °C. Este procedimento de movimentação na estrutura ocorre em duas etapas conforme a temperatura de aquecimento. Na primeira etapa, para a gipsita aquecida até ~160 °C, das oito moléculas de água presentes na célula unitária seis adquirem energia suficiente para romper as ligações químicas e evaporam. Quando a temperatura ultrapassa ~180 °C, as moléculas restantes adquirem energia superior à energia das ligações químicas e também saem da estrutura cristalina. Essa característica explica o interesse econômico atribuído à gipsita que consiste na ocorrência das etapas de desidratação parcial e total, resultando na formação do gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) e da anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), respectivamente (Bell, 1994; Baltar, Bastos e Luz, 2008; Tino, 2016).

Dentre as principais propriedades físicas e mecânicas da gipsita destacam-se: dureza 2 na escala de Mohs, massa específica entre 2,34 a 2,47 g/cm<sup>3</sup>, resistência à tração entre 1,60 a 5,20 MPa, módulo de Young entre 18,1 a 46,8 MPa e coeficiente de Poisson entre 0,19 a 0,32 MPa. Quanto ao seu brilho, pode ser vítreo, sedoso e nacarado. A cor varia entre branco, incolor, cinzento, amarelo, castanho e vermelho. Essas variações estão relacionadas à presença de impurezas e/ou minerais acessórios. Além disso, o hábito varia entre fibroso, granular, lamelar e prismático (Bell, 1994; Klein e Dutrow, 2012).

## **2.2 Fundamentos da moagem ultrafina**

A moagem ultrafina, também denominada moagem de alta energia, é uma operação mecânica, na área de processamento mineral, que produz partículas de dimensões finas (< 100 µm) e ultrafinas (< 10 µm), podendo ser realizada via seco ou via úmido. A moagem promove um expressivo aumento da área superficial específica (SSA) e, conseqüentemente, da reatividade química dos materiais. Contudo, a moagem de alta energia apresenta uma série de limitações devido aos seus problemas operacionais, dentre eles: o alto consumo de energia, a formação de aglomerados de partículas e a amorfização da estrutura cristalina (Wellenkamp, 1999; Guzzo, Santos e Tino, 2015; Barros, 2019).

Segundo a teoria de Griffith, os materiais sólidos são fragmentados devido à propagação de microtrincas que agem como concentradores de tensão, facilitando a fragmentação após a submissão de uma tensão. Essa tensão concentrada na extremidade das microtrincas é expressivamente maior que a tensão média na seção transversal do material solicitado (King, 2001). Todavia, ao reduzir o tamanho de partícula, ocorre redução na quantidade das

microtrincas por unidade de volume causando um aumento da energia necessária para promover a fragmentação. O aporte energético disponibilizado pelos moinhos de alta energia durante tempos prolongados de moagem pode ocasionar uma mudança do mecanismo de dissipação de energia no interior do sólido, de fratura frágil para deformação plástica, e no aumento das distorções na estrutura cristalina dos minerais constituintes. Essa transformação é caracterizada pelo limite aparente de moagem, o qual a partir deste ponto não ocorre redução do tamanho de partícula. Esse limite vem sendo relacionado com a aglomeração entre partículas submicrométricas (Guzzo, Santos e Tino, 2015; Tino, 2016; Barros, 2019; Soares e Guzzo, 2019).

A diversidade de moinhos é atribuída à variedade dos parâmetros de moagem e, principalmente, das propriedades mecânicas dos materiais a serem moídos. Os moinhos utilizam mecanismos distintos de fragmentação, quais sejam: atrito, compressão e impacto e devido a esses mecanismos os moinhos são classificados em: (i) com meio moedor; (ii) de choque; (iii) a jato e (iv) de rolos verticais (Wellenkamp, 1999).

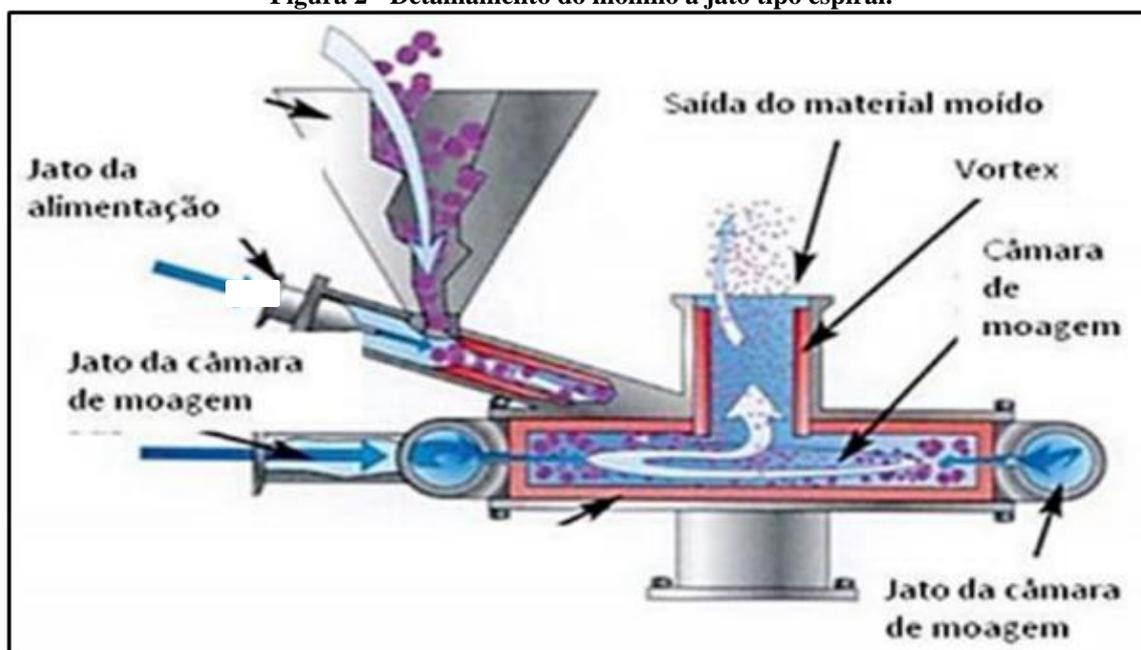
### **2.3 Moinho a jato: princípio de funcionamento e variáveis operacionais**

Os moinhos a jato utilizam ar comprimido, gases inertes ou vapor superaquecido como meio energético para promover a fragmentação das partículas em seu interior. Esses gases são utilizados para o aceleração das partículas e promoção do choque partícula-partícula e partícula-parede. Assim, a moagem nesse tipo de moinhos é classificada como autógena. Ou seja, as próprias partículas servem como meio moedor. Desse modo, ocorre um menor desgaste do equipamento e um menor grau de contaminação. Os tipos de moinho a jato são: (a) de impacto; (b) de jatos opostos; (c) de jato espiral; (d) de jato opostos a leito fluidizado e (e) de câmara oval (Wellenkamp, 1999; Chamayou e Dodds, 2007).

A alimentação dos moinhos de jatos espiral ocorre por meio de um tubo de Venturi em uma câmara plana com o formato de disco achatado no qual é injetado jatos com alta velocidade. Este arranjo faz com que se origine um vórtice giratório de alta velocidade na câmara de moagem. Este vórtice além de atuar na cominuição, funciona também como um classificador do tamanho de partículas devido à força centrífuga que atua sobre cada partícula. O mecanismo de quebra consiste sobretudo do impacto partícula-partícula, que ocorre devido ao choque em alta velocidade das partículas da alimentação com as partículas que estão circulando na câmara. Quanto maior for a taxa de alimentação do moinho, mais grossa será a granulometria do produto de moagem pois a força centrífuga é menor. A Figura 2 apresenta o moinho de jato espiral e

seus componentes. É possível observar que o material é alimentado através de um funil, no qual é transportado para câmara de moagem pelo jato de ar comprimido atuante. Na câmara de moagem, o material sofre a ação da fragmentação por impacto partícula-partícula e o vórtice em espiral proporcionará uma classificação granulométrica em que as partículas finas são deslocadas juntamente com o ar para a saída, enquanto as partículas de maior granulometria permanecem na câmara de moagem até atingirem o tamanho ideal. Os parâmetros operacionais, tais como a taxa de alimentação, a taxa do fluxo de ar na alimentação e na câmara de moagem, afetam o produto da moagem no moinho a jato espiral. Os parâmetros de design relacionados à configuração e geometria do moinho também afetam o produto da moagem (Chamayou e Dodds, 2007; Soares, 2016).

**Figura 2 - Detalhamento do moinho a jato tipo espiral.**



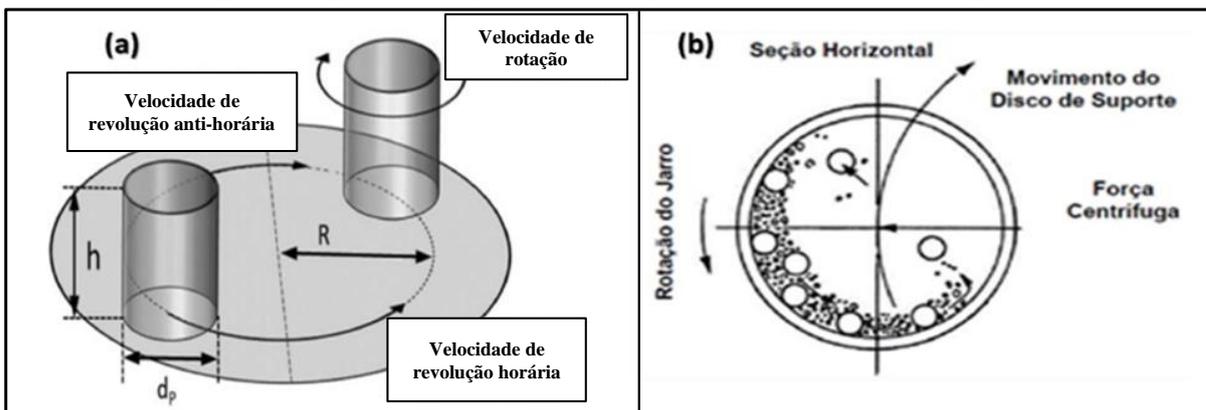
Fonte: adaptado de Soares, 2016.

#### **2.4 Moinho Planetário: princípio de funcionamento e variáveis operacionais**

Os moinhos planetários apresentam como componentes um disco central e potes de variados materiais. Os potes são acoplados ao disco que gira em torno de um eixo central, em um movimento de revolução. Simultaneamente, os potes giram em torno de seu próprio eixo em um movimento de rotação. Os potes e o disco podem girar em direções iguais ou opostas. A combinação dos movimentos de revolução e rotação geram forças como a centrífuga que provoca o escorregamento das bolas pela parede interna do pote juntamente com o material, promovendo uma fragmentação por atrito. Além disso, em simultâneo, as bolas se desprendem da parede do pote e colidem na parede oposta, promovendo cominuição por impacto na ordem

de 25 g de aceleração. Essa força de impacto apresenta uma maior intensidade quando comparada à moagem convencional. Este efeito está relacionado à força inercial de Coriolis, que é resultante dos movimentos do disco central e do pote quando giram em direções opostas. A Figura 3 mostra de forma esquemática os mecanismos de fragmentação observados no interior dos potes (Wellenkamp, 1999; Burmeister e Kwade, 2013).

**Figura 3 - Representação de funcionamento do moinho planetário e seus componentes: os movimentos de revolução e rotação (a) e trajetórias dos corpos moedores no interior do pote (b).**



Fonte: adaptado de Barros, 2019.

Ao cominuir um material em um moinho planetário, após alcançar o limite aparente de moagem, acredita-se que a energia empregada para a fragmentação se concentra na estrutura cristalina. Esta energia armazenada gera as deformações plásticas e posteriormente a formação e/ou intensificação de defeitos em níveis atômicos a micrométricos na estrutura cristalina. O acréscimo da concentração desses defeitos provoca desestabilização da fase cristalina. Relacionado ao nível atômico, o rompimento das ligações químicas acarreta o aumento de cargas livres na superfície das partículas moídas, provocando também um aumento de energia livre do sistema. A estabilização das partículas está relacionada com a interação entre elas, criada pelas cargas superficiais através de forças de Van der Waals. O resultado dessa interação são os aglomerados de partículas (Suryanarayana, 2001; Guzzo, Santos e Tino, 2015; Tino, 2016; Barros, 2019).

## 2.5 Moagem ultrafina de gipsita

A utilização da gipsita com granulometria ultrafina vem crescendo ao longo das últimas décadas para a produção do gesso tipo alfa e de outros insumos como papel, tintas e inseticidas (Lyra Sobrinho e Dantas, 2009). Os trabalhos científicos de Zhang, Kasai e Saito (1996), Tino (2016) e Idelfonso (2021) estudaram o processamento ultrafino de gipsita.

Zhang, Kasai e Saito (1996) investigaram as mudanças mecano-químicas causadas na gipsita a partir de moagem intensa com minerais hidratados em um moinho planetário. A metodologia consistiu na adição de um percentual de um mineral hidratado (caulinita, talco ou montmorilonita) à gipsita e realização de uma série de ensaios de moagem. As amostras foram cominuídas em diferentes intervalos de tempo, utilizando potes e corpos moedores de ágata. Eles constataram nos ensaios que as reações mecânicas induziram a desidratação da gipsita e a presença dos minerais hidratados facilita a formação do gesso. Assim, eles mostraram que a gipsita é transformada em gesso após 120 minutos de moagem com diferentes concentrações a depender do mineral hidratado empregado. Esta transformação ocorre pois esses minerais absorvem a molécula de água da estrutura da gipsita durante a moagem e passam por um processo de amorfização.

Tino (2016) estudou a distribuição granulométrica e a morfologia das partículas em função dos parâmetros operacionais de moagem em moinho planetário de bolas e as diferenças entre os estados particulados e modificações da estrutura cristalina das variedades de gipsita alabastro e *Johnson* em granulometria ultrafina. Para isso, o referido autor preparou alíquotas de alimentação de ~50 mL compreendidas entre a faixa de 417 e 833  $\mu\text{m}$ . Assim, ele constatou que a moagem superior a 480 minutos provocou significativo aumento da área superficial específica, das concentrações da fase amorfa e de anidrita em ambas as variedades. O limite aparente de moagem foi atingido após 30 minutos para a alabastro e após 15 minutos para a *Johnson*. De forma comparativa, a *Johnson* apresentou menor resistência à fragmentação e maior aumento nos diâmetros nominais para as alíquotas intensamente cominuídas.

Idelfonso (2021) investigou a adequação de parâmetros operacionais no desempenho do moinho a jato sobre a distribuição granulométrica resultante da moagem de gipsita *Johnson* e alabastro e os efeitos do hábito cristalino na produção de ultrafinos. Foi constatado que o hábito cristalino não afeta significativamente a distribuição granulométrica resultante. Para ambas as variedades, foram atingidas granulometrias ultrafinas para as faixas de alimentação compreendidas entre 53 e 150  $\mu\text{m}$ . Ademais, foi observada a completa destruição do hábito fibroso de alabastro e a ausência de aglomeração expressiva das alíquotas cominuídas.

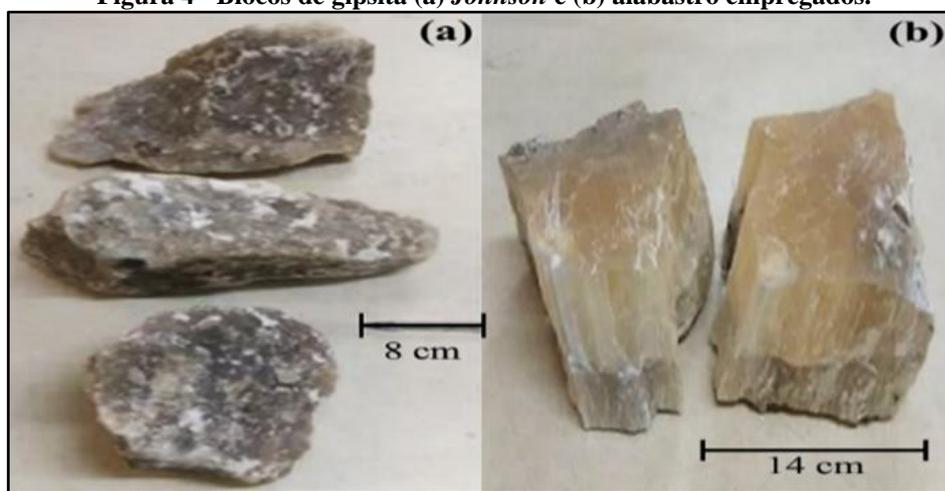
### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

As metodologias, procedimentos e análises empregadas descritas referentes aos ensaios em moinho a jato deste presente estudo foram realizadas anteriormente pelo autor durante seu estudo em Idelfonso (2021) e para os ensaios em moinho planetário foram realizadas no presente estudo.

### 3.1 Procedência das amostras

Para este estudo, foram utilizadas amostras de gipsita das variedades *Johnson* e alabastro anteriormente fornecidas em formato de blocos pela Mineradora São Jorge (Ouricuri-PE). No estudo de Batista Leal (2018), realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM-UFPE), fragmentos de blocos com massa total de ~4,9 kg de *Johnson* e ~5,8 kg de alabastro foram cominuídos em uma série de britagens e posteriormente classificados granulometricamente nas seguintes faixas: +840  $\mu\text{m}$ ; 500x840  $\mu\text{m}$ ; 250x500  $\mu\text{m}$ ; 150x250  $\mu\text{m}$ ; 75x150  $\mu\text{m}$  e -75  $\mu\text{m}$ . A Figura 4 apresenta os fragmentos de blocos de *Johnson* e alabastro empregados neste trabalho.

Figura 4 - Blocos de gipsita (a) *Johnson* e (b) alabastro empregados.



Fonte: Idelfonso (2021), adaptado de Batista Leal (2018).

### 3.2 Preparação de alíquotas para o moinho a jato

Os finos dos produtos das britagens de *Johnson* e alabastro (75x150  $\mu\text{m}$  e -75  $\mu\text{m}$ ) de Batista Leal (2018) foram submetidos a uma reclassificação granulométrica nas seguintes faixas: 105x150  $\mu\text{m}$ ; 75x105  $\mu\text{m}$ ; 53x75  $\mu\text{m}$ ; 38x53  $\mu\text{m}$ ; -38  $\mu\text{m}$ . A Tabela 1 apresenta o resultado dessa reclassificação granulométrica dos produtos das britagens dos blocos de gipsita.

Tabela 1 - Reclassificação granulométrica dos produtos das britagens dos blocos de gipsita.

Faixa ( $\mu\text{m}$ )	<i>Johnson</i>	alabastro
	Massa retida (g)	Massa retida (g)
150x250	317,70	591,90
105x150	123,20	474,40
75x105	219,50	384,40
53x75	111,70	103,50
38x53	66,40	96,40
-38	111,90	75,20
Total	950,40	1725,80

Fonte: adaptado de Idelfonso (2021).

Os ensaios de moagem para a preparação de alíquotas de alimentação para o moinho a jato foram empregados em duas etapas distintas com o objetivo de produzir ~200 g de material para faixas granulométricas inferiores a  $150 \times 250 \mu\text{m}$ . Na primeira etapa, em um moinho vibratório *Fritsch*, modelo *Pulverisette 0*, utilizando 1 pote de 200 mL e 1 bola de 50 mm de zircônia em ambiente a seco. Para a segunda etapa, foi adotada uma cominuição manual por atrito e impacto com o uso de um pistilo de 7,7 cm de diâmetro e um almofariz de porcelana com as seguintes dimensões: diâmetros interno de 18 cm e externo de 24 cm e volume de 2 L. A Figura 5 apresenta o equipamento e os componentes utilizados na etapa de preparação de alíquotas de gipsita.

**Figura 5 - Moinho vibratório (a), detalhe da câmara de moagem (b) e almofariz (c) empregados.**



Fonte: Idelfonso (2021).

Na moagem em moinho vibratório, os ensaios foram realizados de forma contínua nas amostras de alabastro com os seguintes parâmetros: faixa de alimentação:  $150 \times 250 \mu\text{m}$  e  $105 \times 150 \mu\text{m}$ ; sub-alíquotas: 5 e 10 g; tempo de moagem: 1 min, 6 min, 10 min e 15 min; e amplitude de vibração de 0,5 mm, 0,6 mm, 1,0 mm e 1,5 mm. Enquanto os ensaios nas amostras de *Johnson* foram realizados com os seguintes parâmetros: faixa de alimentação:  $150 \times 250 \mu\text{m}$ ; sub-alíquotas: 5 e 10 g; tempo de moagem: 6 e 10 min e amplitude de vibração: 0,6 mm e 1,0 mm. A Tabela 2 apresenta todos os parâmetros operacionais empregados na primeira etapa dos ensaios de preparação. Na moagem manual, utilizou-se das seguintes condições operacionais para a produção de novas alíquotas de ambas as variedades: faixa de alimentação:  $150 \times 250 \mu\text{m}$ , sub-alíquotas: 10 g e tempo de moagem: 20 min em 2 ciclos de 10 min cada.

**Tabela 2 - Parâmetros operacionais empregados nos ensaios de moagem em moinho vibratório.**

Amostra	Faixa ( $\mu\text{m}$ )	Sub-alíquota (g)	Tempo (min)	Amplitude (mm)
alabastro	150x250	5	1	0,5
		5	6	0,6
		10	10	1,0
	105x150	10	10	1,0
		10	15	1,5
Johnson	150x250	5	6	0,6
		10	10	1,0

Fonte: adaptado de Idelfonso (2021).

Para a classificação granulométrica, as sub-alíquotas cominuídas na etapa de preparação de alíquotas foram peneiradas manualmente de duas formas distintas: (i) após a moagem em moinho vibratório, o material resultante de cada ensaio foi armazenado e posteriormente classificado sucessivamente nas peneiras com as seguintes aberturas: 150  $\mu\text{m}$ , 105  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$ , 53  $\mu\text{m}$  e 38  $\mu\text{m}$ ; (ii) após 10 min de moagem manual, o material de cada ensaio foi classificado com uma peneira de abertura de 75  $\mu\text{m}$ . A fração retida da peneira foi cominuída em um outro ciclo de 10 min seguida do mesmo procedimento de classificação. A fração retida remanescente foi então classificado com as peneiras de 150  $\mu\text{m}$  e 105  $\mu\text{m}$  de abertura. A fração passante no primeiro e segundo ciclos foram homogeneizadas e posteriormente classificadas nas aberturas de 53  $\mu\text{m}$  e 38  $\mu\text{m}$ . Após isso, os materiais anteriormente preparados (Batista Leal, 2018) e os classificados pelo autor (Idelfonso, 2021), de mesma faixa granulométrica, foram homogeneizados.

Segundo Idelfonso (2021), os ensaios de moagem em moinho vibratório foram apropriados para a preparação das faixas mais grossas (105x150  $\mu\text{m}$  e 75x105  $\mu\text{m}$ ) e a moagem por cominuição manual foi adequada para a produção de partículas na faixa de 53x75  $\mu\text{m}$ . A Tabela 3 apresenta a classificação granulométrica final das faixas de partículas de gipsita após a preparação de alíquotas. As faixas 105x150  $\mu\text{m}$ ; 75x105  $\mu\text{m}$  e 53x75  $\mu\text{m}$  de partículas de Johnson e alabastro foram as que alcançaram a massa almejada para realização dos ensaios de moagem em moinho a jato. Dessa maneira, as faixas 38x53  $\mu\text{m}$  e -38  $\mu\text{m}$  não foram empregadas.

**Tabela 3 - Classificação granulométrica final das partículas de gipsita após a preparação de alíquotas para os ensaios de moagem ultrafina em moinho a jato.**

Faixa ( $\mu\text{m}$ )	Johnson		alabastro	
	Massa retida (g)	Fração retida (%)	Massa retida (g)	Fração retida (%)
<b>105x150</b>	<b>221,22</b>	<b>23,25</b>	<b>477,94</b>	<b>34,10</b>
<b>75x105</b>	<b>300,02</b>	<b>31,53</b>	<b>508,12</b>	<b>36,25</b>
<b>53x75</b>	<b>199,51</b>	<b>20,97</b>	<b>202,29</b>	<b>14,43</b>
38x53	73,33	7,71	104,25	7,44
-38	113,00	11,88	77,90	5,56

Fonte: adaptado de Idelfonso (2021).

### 3.3 Preparação de alíquotas para o moinho planetário

As mesmas amostras de gipsita *Johnson* e alabastro provenientes das séries de britagens de Batista Leal (2018) foram também empregadas para a preparação de alíquotas para alimentação dos ensaios de moinho planetário. Para isso, foi realizada uma nova classificação granulométrica das alíquotas remanescente dos estudos de Idelfonso (2021) e Martins (2023). A Tabela 4 ilustra a classificação granulométrica das amostras remanescentes.

**Tabela 4 – Classificação granulométrica das amostras de gipsitas remanescentes.**

Faixa granulométrica ( $\mu\text{m}$ )	Massa retida <i>Johnson</i> (g)	Massa retida alabastro (g)
250x415	0,0	589,3
105x150	309,5	0,0
75x105	0,0	0,0
53x75	164,2	160,8
Total	473,7	750,1

Fonte: de autoria própria (2023).

Para produzir alíquotas de ~100 g de alimentação nas mesmas faixas granulométricas empregadas nos ensaios de moagem em moinho a jato (105x150  $\mu\text{m}$ ; 75x105  $\mu\text{m}$ ; 53x75  $\mu\text{m}$ ), optou-se por utilizar da técnica de cominuição manual adotando os mesmos equipamentos empregados no Item 3.2. Referente a amostra de alabastro foi empregado os seguintes parâmetros operacionais: faixa de alimentação: 250x500  $\mu\text{m}$ , sub-alíquotas: 10 g e tempo de moagem: 10 min em ciclo único. Enquanto para a amostra *Johnson* consistiu na adoção das respectivas condições operacionais: faixa de alimentação de 150x250  $\mu\text{m}$ , sub-alíquotas com massa igual a 10 g e tempo de moagem contendo ciclo único de 4 min.

Na etapa de classificação granulométrica para os ensaios em moinho planetário, as sub-alíquotas que foram cominuídas na etapa de preparação de alíquotas foram peneiradas sucessivamente em peneiras com as seguintes aberturas: 150  $\mu\text{m}$ , 105  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$  e 53  $\mu\text{m}$ . A fração retida da cominuição manual foi classificada com as peneiras de 150  $\mu\text{m}$  e 105  $\mu\text{m}$  de abertura. Por fim, os materiais cominuídos passantes, de mesma faixa granulométrica, na peneira de abertura de 150  $\mu\text{m}$  foram homogeneizados de maneira manual. A Tabela 5 apresenta granulométrica final da preparação de alíquotas para os ensaios de moagem ultrafina em moinho planetário. Observa-se que todas as faixas granulométricas apresentaram uma massa compatível com a almejada para a realização dos ensaios de moagem de alta energia em moinho planetário.

**Tabela 5 – Classificação granulométrica final da etapa de preparação de alíquotas para os ensaios de moagem ultrafina em moinho planetário.**

Faixa ( $\mu\text{m}$ )	Massa retida Johnson (g)	Massa retida alabastro (g)
105x150	142,50	153,60
75x105	105,40	97,30
53x75	158,20	125,40
Total	406,10	376,30

Fonte: de autoria própria (2023).

### 3.4 Ensaios de moagem ultrafina em moinho a jato

O alimentador *Accuratefeeder 106M* foi empregado em estudos anteriores, no LTM/UFPE, de moagem ultrafina de quartzo para alimentação do moinho a jato (Soares, 2016; Soares e Guzzo, 2019). Contudo, Idelfonso (2021) encontrou dificuldades para a realização da calibração do alimentador com o material gipsita devido ao empastamento do material causado pela sua natureza higroscópica. Assim, foi utilizada uma calha vibratória móvel *Equimag, 15A*, um funil de alimentação e um anteparo de poliestireno expandido para ser implementado como sistema de alimentação. Dessa maneira, foi realizada uma série de ensaios com as seguintes faixas granulométricas: 105x150  $\mu\text{m}$ ; 75x105  $\mu\text{m}$ ; 53x75  $\mu\text{m}$  de gipsita *Johnson* e alabastro para obtenção das taxas de alimentação aproximadas do novo sistema. A Tabela 6 apresenta os valores médios de alimentação da gipsita *Johnson* e alabastro no novo sistema.

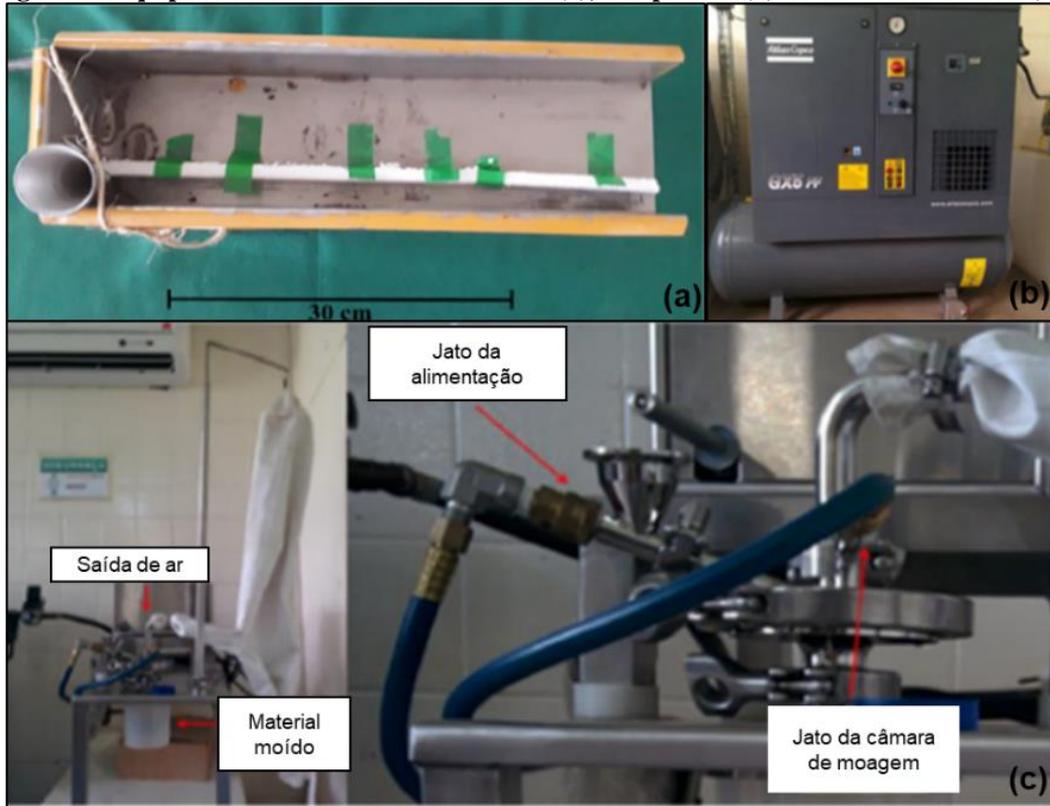
**Tabela 6 – Valores médios de alimentação da gipsita no novo sistema.**

Faixa ( $\mu\text{m}$ )	<i>Johnson</i> (g/min)	alabastro (g/min)
105x150	2,82 $\pm$ 0,29	2,29 $\pm$ 0,19
75x105	1,76 $\pm$ 0,18	0,56 $\pm$ 0,04
53x75	1,12 $\pm$ 0,12	0,68 $\pm$ 0,08

Fonte: adaptado de Idelfonso, 2021.

Os ensaios de moagem ultrafina em moinho a jato foram realizados de maneira contínua em um modelo tipo espiral *Micron-Master Jet Pulverizer 02-612-wc*, o compressor *Atlas Copco GX5 FF* e o sistema de alimentação do moinho utilizados, conforme apresentado na Figura 6. Para todos os ensaios, foram ajustadas as válvulas para utilizar pressões de 6 bar na alimentação e de 2 bar na câmara de moagem.

Figura 6 - Equipamentos utilizados: alimentador (a); compressor (b) e detalhes do moinho (c).



Fonte: adaptado de Soares, 2016.

### 3.5 Ensaios de moagem ultrafina em moinho planetário

Os ensaios de moagem de alta energia em moinho planetário de bolas foram empregados, em ambiente à seco, em um moinho da empresa *Fritsch*, modelo *Pulverisette5*. Para os ensaios, adotou-se uma velocidade de revolução de 300 rpm, 2 potes de 250 ml cada e 25 corpos moedores esféricos de 10 mm cada. Os potes e os corpos moedores são de zircônia com densidade igual a 5,7 g/cm<sup>3</sup>. A escolha da velocidade de revolução e dos recipientes utilizados, bem como o dimensionamento dos corpos moedores, foram estabelecidos de maneira análoga a metodologia empregada por Tino (2016) para posterior análise comparativa do efeito da aglomeração de partículas. A Figura 7 apresenta o moinho planetário, os potes e os corpos moedores utilizados neste trabalho.

Figura 7 - Moinho planetário de bolas, potes e esferas de zircônia empregados neste estudo.



Fonte: adaptado de Tino, 2016.

Com o objetivo de realizar um estudo comparativo da moagem em moinho planetário com a moagem em moinho a jato, os tempos de moagem para os ensaios em moinho planetário foram definidos em função das taxas de moagem dos ensaios em moinho a jato realizados por Idelfonso (2021), seguindo um critério de equivalência proposto por Soares e Guzzo (2019). Assim, a massa de alimentação de 45 g (~37 mL) das alíquotas preparadas foi multiplicada por um fator igual a 4 (correspondente ao número de potes suportados no equipamento). A (Equação 1) exibe a equação matemática referente a massa total admissível em um moinho planetário. Após isso, Soares e Guzzo (2019) definiram que o tempo de moagem em moinho planetário é igual à razão entre a massa total admissível pela taxa de moagem do moinho a jato, conforme representada na (Equação 2).

$$m_t = m_a \times n_p \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- $m_t$  é a massa total admissível, em g;
- $m_a$  é a massa da alíquota, em g;
- $n_p$  é o número de potes admissíveis no moinho planetário.

$$t = \frac{m_t}{tx} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

- $t$  é o tempo de moagem em moinho planetário, em min;
- $m_t$  é a massa total admissível, em g;
- $tx$  é a taxa de moagem em moinho a jato, em g/min;

Dessa maneira, realizando os cálculos da (Equação 1)(Equação 2 para cada faixa granulométrica de gipsita *Johnson* e alabastro foram estabelecidos os seguintes tempos de moagem para os ensaios em moinho planetário: (i) 100 min para a gipsita *Johnson* e alabastro na faixa de alimentação 105x150  $\mu\text{m}$ ; (ii) 110 min para a *Johnson* para a faixa 75x105  $\mu\text{m}$ ; (iii) 170 min para a *Johnson* de faixa de alimentação 53x75  $\mu\text{m}$ ; e (iv) 330 min para a gipsita alabastro para as faixas 75x105  $\mu\text{m}$  e 53x75  $\mu\text{m}$ . A Tabela 7 expõe os valores equivalentes entre os tempos de moagem e as taxas de alimentação após o critério de conversão adotado.

**Tabela 7 – Tempos de moagem empregados nos ensaios em moinho planetário.**

Faixa granulométrica ( $\mu\text{m}$ )	Variedade da gipsita	Massa das alíquotas (g)	Taxa de moagem (g/min)	Tempo de moagem (min)
105x150	<i>Johnson</i>	45	1,8	100
	alabastro	45	1,8	100
75x105	<i>Johnson</i>	45	1,7	110
	alabastro	45	0,6	330
53x75	<i>Johnson</i>	45	1,1	170
	alabastro	45	0,5	330

Fonte: de autoria própria (2023).

Os quatros ensaios foram realizados em regime de batelada em períodos de 10 minutos e em pausas de 2 minutos que representam os momento de inversão da direção de rotação do moinho. A Tabela 8 apresenta a metodologia de programação adotada para realização dos ensaios de moagem em moinho planetário.

**Tabela 8 - Programação adotada para realização dos ensaios de moagem ultrafina em moinho planetário.**

Ensaio	Pote 1	Pote 2	Tempo de moagem (min)	Período de moagem (min)	Repetições	Tempo de pausa (min)
1	<i>Johnson</i> 105x150 $\mu\text{m}$	alabastro 100x150 $\mu\text{m}$	100	10	10	2
2	<i>Johnson</i> 75x105 $\mu\text{m}$	<i>Johnson</i> 75x105 $\mu\text{m}$	110	10	11	2
3	<i>Johnson</i> 53x75 $\mu\text{m}$	<i>Johnson</i> 53x75 $\mu\text{m}$	170	10	17	2
4	alabastro 75x105 $\mu\text{m}$	alabastro 53x75 $\mu\text{m}$	330	10	33	2

Fonte: de autoria própria (2023).

Além disso, também foram realizados ensaios complementares de moagem com o intuito de melhor compreender o efeito da aglomeração de partículas finas e ultrafinas no material estudado. Para isso, foi fixado um tempo de moagem de 15 minutos, 3 repetições e tempo de pausa de 2 minutos para as amostras de gipsita *Johnson* e alabastro de faixa granulométrica 105x150  $\mu\text{m}$  e para as gipsitas alabastro de faixas granulométricas 75x105 e 53x75  $\mu\text{m}$ .

### **3.6 Análises granulométricas e morfológicas**

As análises granulométricas de todas as alíquotas de gipsita foram efetuadas em um granulômetro a laser *Malvern, Mastersizer 2000*, cujo limite inferior de detecção é 10 nm e o superior é 2000  $\mu\text{m}$ . As medidas foram efetuadas via seco utilizando o acessório *Scirocco*. A distribuição granulométrica de cada faixa granulométrica de alíquota foi medida três vezes, sendo que cada medida é correspondente à média de três leituras. Durante a realização das medidas foram introduzidos os seguintes parâmetros da gipsita: massa específica de 2,31  $\text{g}/\text{cm}^3$ , índice de refração de 1,519 e absorção de 0,1. Por meio das curvas de distribuição granulométrica obtidas foram determinados os diâmetros característicos  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$ , a heterogeneidade de distribuição ( $d_{90}/d_{10}$ ) e a área superficial específica (SSA). Os diâmetros  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$  representam respectivamente, às aberturas relativas da peneira onde passam 10, 50 e 90 % de material.

Para a realização da análise qualitativa da morfologia das partículas de gipsita alabastro, foram utilizadas as imagens obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do estudo de Guzzo *et al* (2022) em moinho planetário de bolas e em moinho a jato. As imagens das alíquotas dos ensaios em moinho planetário foram obtidas com o microscópio *FEI Quanta 400* do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), no Rio de Janeiro, com tensão de 20 kV e detector de elétrons retroespalhados. Os aumentos empregados variaram entre 1000 e 4000 vezes. Enquanto as imagens das partículas dos ensaios em moinho a jato foram adquiridas por meio de um microscópio eletrônico *JEOL-JSM-6460* no Laboratório de Dispositivos de Nanoestruturas (LDN) do Departamento de Eletrônica e Sistemas (DES-UFPE) com tensão de aceleração dos feixes de 30 kV. Foi utilizado o detector de elétrons secundários. Os aumentos empregados variaram entre 60 e 4000 vezes. Todas as partículas foram recobertas com filme de ouro e as análises realizadas em alto vácuo para garantir a condutividade elétrica na superfície das amostras.

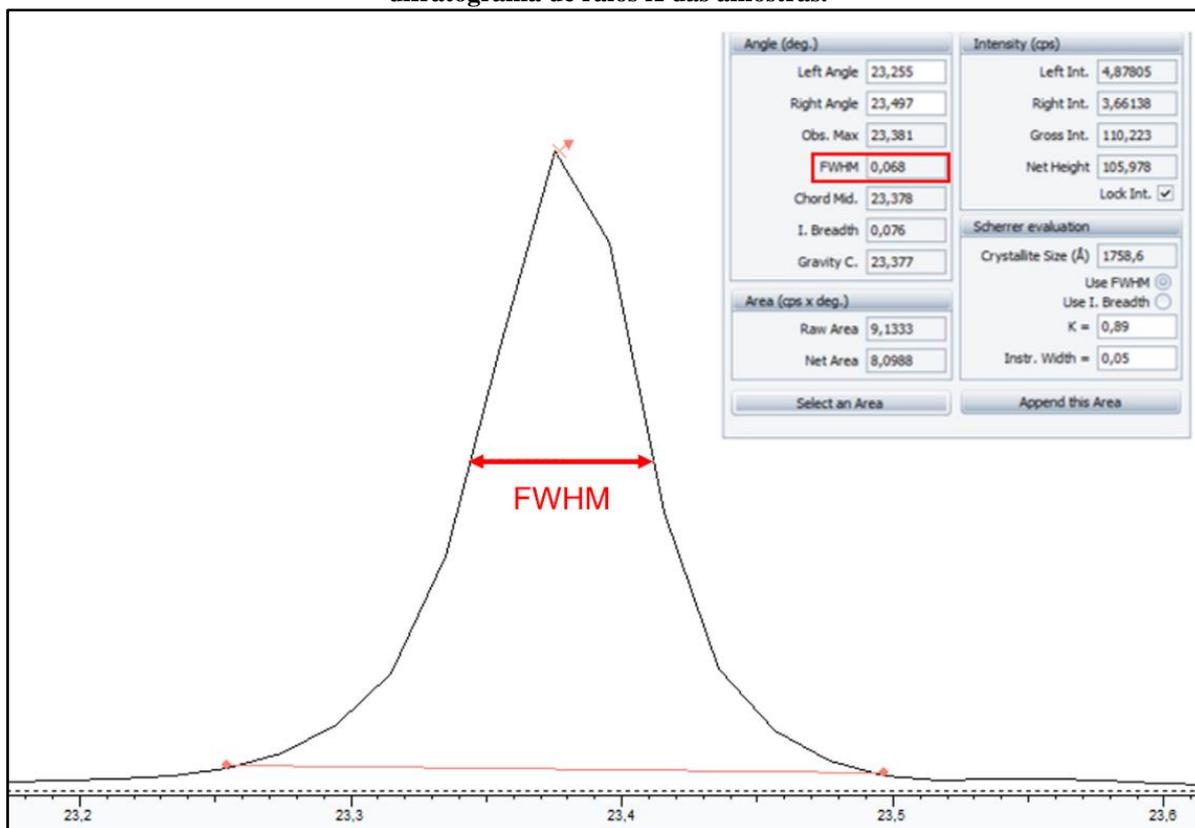
### 3.7 Caracterização estrutural das partículas

A difração de raios X (DRX) foi a técnica de caracterização adotada para análise estrutural das alíquotas de gipsita *Johnson* e alabastro nas condições pré-moagem e pós-moagem. Na condição pré-moagem, as alíquotas da etapa de preparação de amostras na faixa granulométrica 150x250 µm foram caracterizadas e, nesta situação, designadas de alíquotas de alimentação por não terem sofrido nenhum procedimento de moagem ultrafina. Para as condições de pós-moagem ultrafina, as alíquotas cominuídas, da faixa de alimentação 105x150 µm, em moinho a jato e moinho planetário de bolas também foram caracterizadas.

As análises de DRX foram efetuadas pelo método do pó no difratômetro de raios X de bancada móvel *Bruker, D2 Phaser* operando com potência de 300 W (30 kV e 10 mA), irradiação Cu-K<sub>α1</sub> ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) e um detector linear *Bruker, Lynxeye*. Para a obtenção dos difratogramas, os seguintes parâmetros foram definidos: faixa de varredura ( $2\theta$ ) de 4° a 60°; abertura da fenda primária de 0,2 mm; passo do goniômetro de 0,02019 °/s e tempo de contagem por passo de 2,5 s. As análises foram realizadas em condições de temperatura 22 °C e umidade relativa de 40 % no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM/UFPE). Todas as amostras foram cuidadosamente cominuídas com o uso de almofariz e pistilo de ágata, exceto as amostras cominuídas em moinho a jato devido a granulometria final, e preparadas pelo procedimento de *back-loading* (alimentação por trás do porta-amostra). Os difratogramas foram indexados utilizando o programa *Bruker-Diffrac EVA* com o banco de dados *Crystallography Open Database* (COD: 212673-2018).

As possíveis modificações estruturais induzidas pela moagem foram avaliadas medindo todas as larguras a meia altura (FWHM) dos planos cristalográficos (020), ( $\bar{1}21$ ), (040), ( $\bar{1}41$ ) e (002) dos picos de difração. A Figura 8 apresenta a metodologia utilizada para obter o valor de FWHM dos planos cristalógraficos no programa *EVA*. Após isso, foi calculada a variação relativa dos valores de FWHM desses picos de difração relacionados aos planos cristalográficos das alíquotas moídas pelos valores obtidos de FWHM da alíquota de alimentação. A Tabela 8 apresenta os planos cristalinos associados aos picos de difração utilizados para a avaliação estrutural das gipsitas.

**Figura 8 - Interface do programa EVA para obtenção do FWHM dos planos cristalográficos no difratograma de raios X das amostras.**



Fonte: de autoria própria (2023).

**Tabela 9 – Planos cristalinos, ângulos de difração ( $2\theta$ ) e os espaçamentos interplanares ( $d_{hkl}$ ) dos respectivos picos de difração selecionados para avaliação das modificações estruturais da gipsita.**

Plano cristalino	$2\theta$	$d_{hkl}$ (Å)
(020)	11,6	15,2
( $\bar{1}$ 21)	20,7	4,3
(040)	23,4	15,2
( $\bar{1}$ 41)	29,1	3,1
(002)	31,2	5,7

Fonte: de autoria própria (2023).

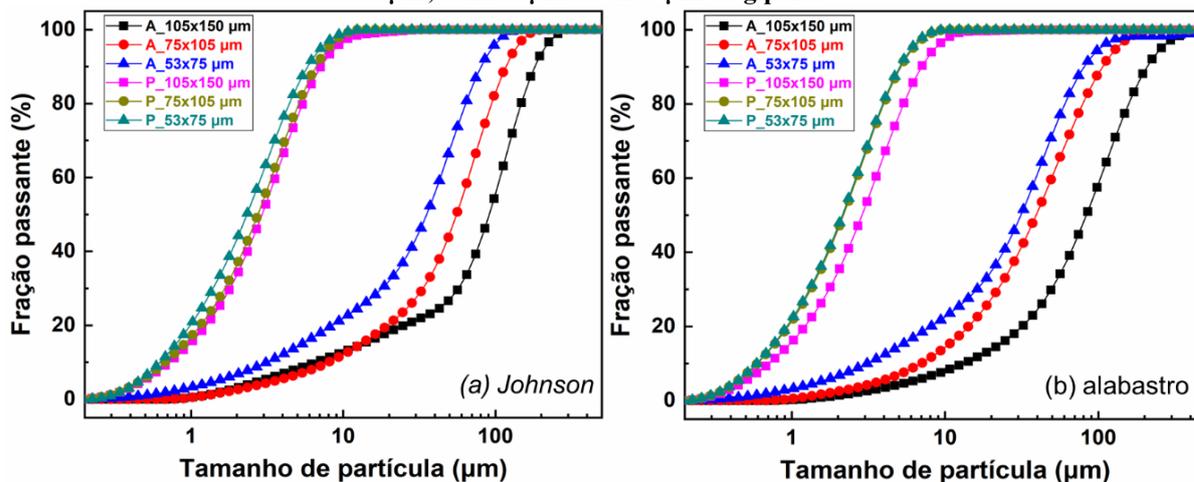
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Moinho a jato: distribuição granulométrica e diâmetros característicos

A Figura 9 apresenta qualitativamente as curvas de distribuição granulométrica da alimentação (A) e do produto de moagem (P) de caixa faixa granulométrica de gipsita. Comportamentos praticamente similares de deslocamentos acentuados à esquerda das curvas

foram observados para ambas as variedades, indicando assim uma elevada diminuição do tamanho de partículas resultante da moagem ultrafina. É possível também observar uma sobreposição das curvas de alabastro para as faixas do produto de moagem 75x105  $\mu\text{m}$  e 53x75  $\mu\text{m}$ , enquanto nas curvas de *Johnson* há um comportamento de maior aproximação para as faixas do produto 105x150  $\mu\text{m}$  e 75x105  $\mu\text{m}$ .

**Figura 9 - Curvas de distribuição granulométrica da alimentação e do material moído das faixas 105x150  $\mu\text{m}$ ; 75x105  $\mu\text{m}$  e 53x75  $\mu\text{m}$  de gipsita.**



Fonte: adaptado de Idelfonso (2021).

A Tabela 10 apresenta os valores médios dos diâmetros característicos ( $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$ ), da heterogeneidade de distribuição ( $d_{90}/d_{10}$ ) e da área superficial específica (SSA) da alimentação e do produto de moagem da gipsita em moinho a jato. O diâmetro médio das partículas ( $d_{50}$ ) apresenta granulometria ultrafina para todas as faixas granulométricas do produto de ambas as variedades. Para a faixa 105x150  $\mu\text{m}$ , os valores dos diâmetros das alíquotas moídas são estaticamente iguais para os dois lotes. No entanto, as alíquotas cominuídas de faixas mais finas apresentam os valores dos diâmetros de *Johnson* levemente maiores ou iguais aos de alabastro. As alíquotas moídas de alabastro nas faixas 75x105  $\mu\text{m}$  e 53x75  $\mu\text{m}$  apresentam todos os seus diâmetros característicos estatisticamente iguais. Segundo Idelfonso (2021), esse comportamento pode indicar um valor próximo ao seu limite aparente de moagem. Referente à SSA, foi constatado um aumento dos valores para todas as faixas após a moagem e valores levemente maiores para as partículas de alabastro quando comparadas as de *Johnson* de mesma faixa granulométrica.

**Tabela 10 – Valores médios dos diâmetros característicos, da heterogeneidade da distribuição e da área superficial específica das alíquotas moídas de gipsita em moinho a jato.**

Faixa (µm)	Gipsita	Taxa de moagem (g/min)	d <sub>10</sub> (µm)	d <sub>50</sub> (µm)	d <sub>90</sub> (µm)	$\frac{d_{90}}{d_{10}}$	SSA (cm <sup>2</sup> /g)
105x150	<i>Johnson</i>	alimentação	7,0 ± 0,0	97,4 ± 0,4	196,0 ± 5,5	27,9 ± 0,8	1.456,9 ± 8,62
		1,8	0,8 ± 0,0	3,1 ± 0,1	7,8 ± 0,6	10,1 ± 0,5	14.425,3 ± 334,8
	alabastro	alimentação	14,4 ± 0,3	88,3 ± 3,3	230,1 ± 16,8	16,0 ± 0,8	982,8 ± 21,6
		1,8	0,8 ± 0,0	3,2 ± 0,1	7,8 ± 0,5	10,3 ± 0,6	14.540,2 ± 386,3
75x105	<i>Johnson</i>	alimentação	8,4 ± 0,2	59,7 ± 1,4	129,4 ± 8,5	15,4 ± 0,9	1.471,3 ± 22,1
		1,7	0,7 ± 0,0	3,0 ± 0,1	7,2 ± 0,3	10,0 ± 0,6	15.301,7 ± 228,1
	alabastro	alimentação	7,4 ± 0,2	42,2 ± 1,1	116,8 ± 3,1	15,7 ± 0,6	1.662,4 ± 30,3
		0,6	0,6 ± 0,0	2,3 ± 0,1	5,6 ± 0,3	8,8 ± 0,6	17.931,0 ± 43,1
53x75	<i>Johnson</i>	alimentação	3,4 ± 0,1	38,0 ± 0,7	86,7 ± 1,1	25,6 ± 0,3	3.492,8 ± 140,0
		1,1	0,6 ± 0,0	2,6 ± 0,1	6,6 ± 0,3	10,1 ± 0,8	16.997,1 ± 203,7
	alabastro	alimentação	3,2 ± 0,1	33,1 ± 0,8	85,8 ± 4,2	26,5 ± 0,7	3.678,2 ± 103,5
		0,5	0,6 ± 0,0	2,3 ± 0,1	5,4 ± 0,3	8,4 ± 0,78	17.931,0 ± 258,6

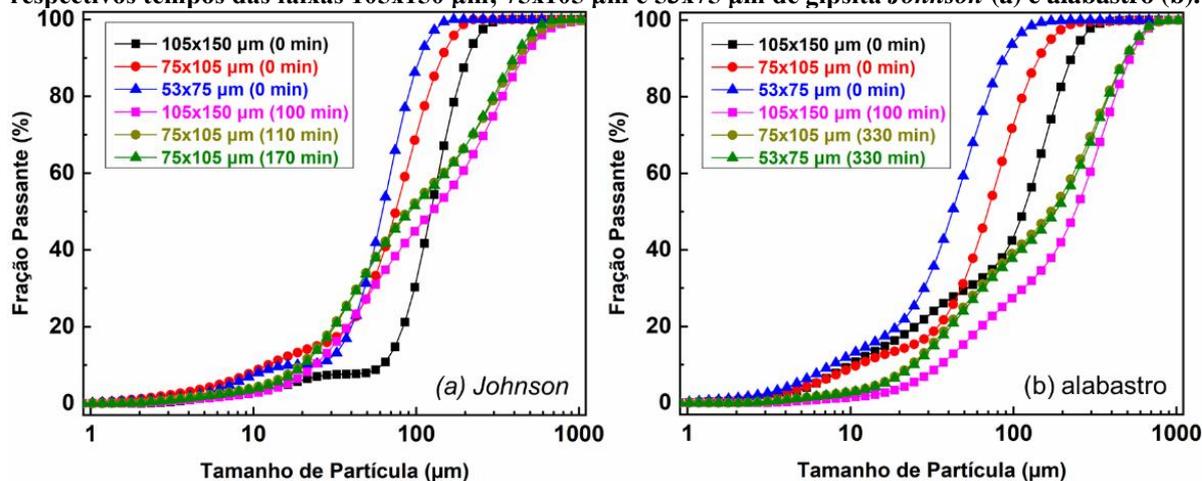
Fonte: adaptado de Idelfonso (2021).

#### 4.2 Moinho planetário: distribuição granulométrica e diâmetros característicos

A

Figura 10 mostra as curvas de distribuição granulométrica da alimentação (0 min) e do produto em diferentes tempos de moagem de caixa faixa granulométrica de gipsita. Observa-se que para um percentual de fração passante superior a 60% há uma tendência de deslocamento à direita das curvas cominuidas para a variedade *Johnson* e para um percentual superior a 40% para a alabastro. Esse comportamento expressa um acréscimo do tamanho de partículas na moagem em moinho planetário para as faixas granulométricas estudadas. Esse fenômeno pode ser explicado pelas interações interpartículas durante a moagem ultrafina que sofreram como resultado um maior efeito da aglomeração de partículas e conseqüentemente o aumento do tamanho médio de partículas.

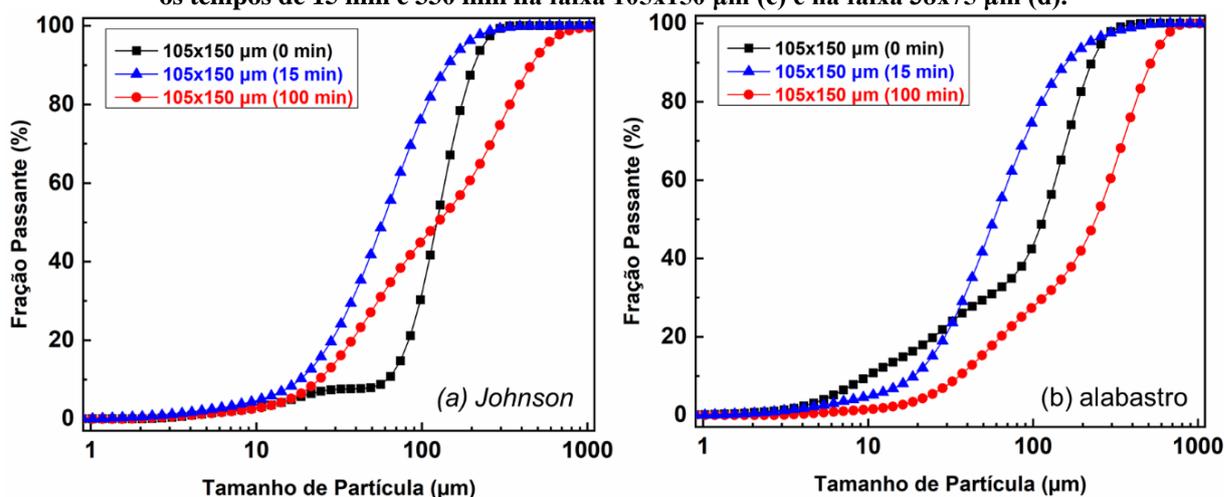
Figura 10 - Curvas de distribuição granulométrica da alimentação (0 min) e do material moído com seus respectivos tempos das faixas 105x150  $\mu\text{m}$ ; 75x105  $\mu\text{m}$  e 53x75  $\mu\text{m}$  de gipsita *Johnson* (a) e alabastro (b).



Fonte: de autoria própria (2023).

A Figura 11 mostra as curvas de distribuição granulométrica da alimentação (0 min) e do produto para os tempos de moagem (15 min e 100 min) para a faixa granulométrica 105x150  $\mu\text{m}$  de gipsita *Johnson* e alabastro. As curvas referentes ao tempo de 15 minutos de moagem apresentam um deslocamento para a esquerda quando comparada às curvas de alimentação, indicando assim que está ocorrendo a fragmentação mineral. Assim, é possível constatar que o hábito cristalino não está causando significativa interferência com relação ao comportamento do produto de moagem para a faixa granulometricamente mais grosseira deste estudo.

Figura 11 - Curvas de distribuição granulométrica da alimentação (0 min) e dos materiais moídos em tempos de 15 min e 100 min na faixa 105x150  $\mu\text{m}$  de gipsita *Johnson* (a) e alabastro (b) e de alabastro para os tempos de 15 min e 330 min na faixa 105x150  $\mu\text{m}$  (c) e na faixa 38x75  $\mu\text{m}$  (d).

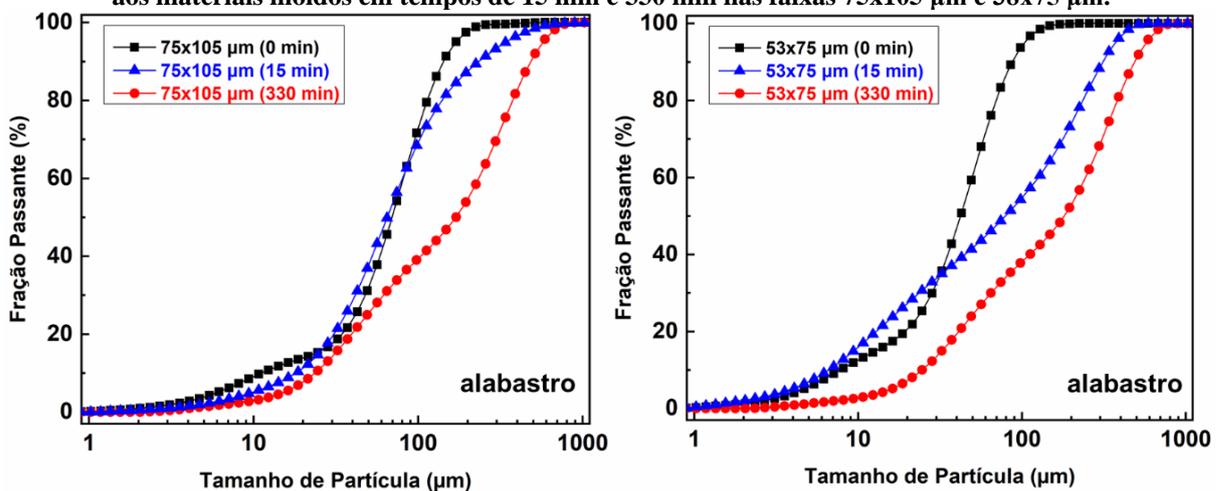


Fonte: de autoria própria (2023).

A Figura 12 apresenta as curvas de distribuição granulométrica de gipsita alabastro da alimentação (0 min) e dos produtos de moagem em 15 min e 100 min para as faixas

granulométricas 75x105  $\mu\text{m}$  e 53x75  $\mu\text{m}$ . Para a faixa 75x105  $\mu\text{m}$  há uma tendência de sobreposição das curvas de alimentação e moídas em 15 minutos. Enquanto para 53x75 é possível observar um comportamento de deslocamento à direita para a alíquota moída em 15 min na fração mais fina do estudo. Dessa maneira, as curvas de distribuição granulométrica dos ensaios exploratórios indicam que para o tempo de 15 min o efeito da aglomeração de partículas torna-se mais significativo ao reduzir a faixa granulométrica de alimentação. Segundo o critério de Griffith, esse comportamento é esperado pois ao reduzir o tamanho de partícula observa-se uma diminuição na densidade das microtrincas por unidade de volume que resultam no aumento da dificuldade em fragmentar o material.

Figura 12 - Curvas de distribuição granulométrica de gipsita alabastro referentes à alimentação (0 min) e aos materiais moídos em tempos de 15 min e 330 min nas faixas 75x105  $\mu\text{m}$  e 38x75  $\mu\text{m}$ .



Fonte: de autoria própria (2023).

A Tabela 11 apresenta os valores médios dos diâmetros característicos ( $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$ ), da heterogeneidade da distribuição ( $d_{90}/d_{10}$ ) e da área superficial específica (SSA) da alimentação e do produto de moagem da gipsita em moinho planetário. O diâmetro médio das partículas ( $d_{50}$ ) apresentou acréscimo do tamanho de partícula para todas as faixas granulométricas do produto de moagem de ambas as variedades quando comparadas as alíquotas cominuídas, em tempos de moagem superiores a 15 minutos, às alíquotas de alimentação, exceto para a faixa 105x150  $\mu\text{m}$  de *Johnson* que obteve um tamanho de partícula estatisticamente igual. Para as frações mais finas, o valor do  $d_{50}$  foi reduzido pela metade para as alíquotas cominuídas em 15 minutos. Para uma mesma faixa granulométrica, as alíquotas cominuídas de alabastro obtiveram, de um modo geral, maiores valores de diâmetros característicos quando comparadas as alíquotas moídas de *Johnson*. Indicando assim uma maior dificuldade de fragmentação para a variedade alabastro. Referente à SSA, observa-se uma redução dos valores para as faixas que foram cominuídas em tempos prolongados de moagem,

exceto para a faixa 105x150 µm que pode ser atribuída ao baixo valor da heterogeneidade da distribuição das alíquotas da alimentação ocasionada durante a preparação das amostras.

**Tabela 11 – Valores médios dos diâmetros característicos das alíquotas moídas de gipsita em moinho planetário.**

Faixa (µm)	Gipsita	Moagem		d <sub>10</sub> (µm)	d <sub>50</sub> (µm)	d <sub>90</sub> (µm)	$\frac{d_{90}}{d_{10}}$	SSA (cm <sup>2</sup> /g)
		Taxa (g/min)	Tempo (min)					
105x150	<i>Johnson</i>	-	-	52,3 ± 24,6	130,4 ± 2,0	221,1 ± 2,7	5,3 ± 3,4	429,2 ± 90,7
		12,0	15	18,1 ± 3,0	61,5 ± 4,1	167,8 ± 30,4	9,3 ± 1,3	853,4 ± 131,5
		1,8	100	26,2 ± 0,5	131,0 ± 9,8	488,2 ± 48,6	18,6 ± 1,7	487,1 ± 11,4
	alabastro	-	-	14,1 ± 3,1	126,8 ± 9,1	243,7 ± 3,4	17,9 ± 4,2	768,7 ± 127,9
		12,0	15	20,9 ± 1,1	64,5 ± 3,7	177,4 ± 12,2	8,5 ± 0,1	760,1 ± 50,5
		1,8	100	38,3 ± 0,6	261,3 ± 5,1	559,1 ± 17,8	14,6 ± 0,3	294,5 ± 4,6
75x105	<i>Johnson</i>	-	-	15,7 ± 2,6	80,2 ± 2,8	150,4 ± 4,9	9,7 ± 1,7	870,7 ± 77,9
		1,7	110	21,3 ± 0,6	96,7 ± 1,8	453,1 ± 16,7	21,3 ± 0,3	632,2 ± 21,3
	alabastro	-	-	18,0 ± 13,8	67,0 ± 10,1	142,2 ± 9,3	11,2 ± 6,6	959,8 ± 336,2
		12,0	15	19,4 ± 0,1	68,6 ± 0,7	282,0 ± 70,1	14,5 ± 3,7	748,6 ± 2,5
		0,6	330	25,5 ± 0,4	186,8 ± 8,1	511,3 ± 15,3	20,1 ± 0,4	461,2 ± 11,4
		-	-	-	-	-	-	-
53x75	<i>Johnson</i>	-	-	19,0 ± 7,6	66,5 ± 1,5	119,3 ± 6,6	7,0 ± 2,9	863,5 ± 84,3
		1,1	170	21,3 ± 0,5	100,0 ± 7,1	441,7 ± 36,1	20,7 ± 1,5	616,4 ± 15,5
	alabastro	-	-	8,3 ± 1,6	45,9 ± 2,3	95,9 ± 4,2	11,8 ± 2,0	1.366,4 ± 198,8
		12,0	15	7,3 ± 0,3	83,5 ± 2,4	362,4 ± 53,2	49,4 ± 5,2	1.431,0 ± 52,4
		0,5	330	26,1 ± 0,3	194,5 ± 5,9	541,3 ± 38,3	20,8 ± 1,4	449,7 ± 6,6
		-	-	-	-	-	-	-

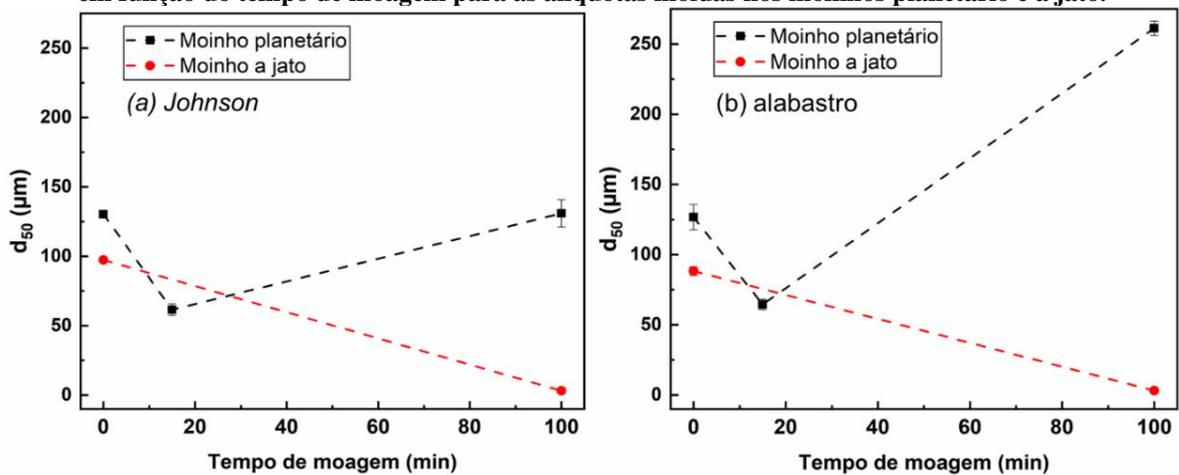
Fonte: de autoria própria (2023).

### 4.3 Análise comparativa entre os produtos das moagens

A Figura 13 apresenta o diâmetro d<sub>50</sub> em função do tempo de moagem para as alíquotas moídas na faixa de alimentação de 105x150 µm no moinho planetário e a jato. Para o tempo de 15 minutos, os diâmetros d<sub>50</sub>, tanto de *Johnson* quanto de alabastro, dos materiais cominuídos em moinho planetário apresentam uma tendência de possuir menores granulometrias do que o materiais moídos em moinho a jato. Porém ao prolongar o tempo, as curvas dos materiais moídos em moinho a jato apresentam um comportamento decrescente, enquanto as curvas das

alíquotas cominuídas em moinho planetário apresentam um comportamento crescente. Assim, para o tempo de moagem de 100 minutos, o  $d_{50}$  do material moído no moinho a jato apresenta tamanho de partícula 42 vezes menor que o material moído no moinho planetário para a gipsita *Johnson* e de aproximadamente 82 vezes menor que a alíquota moída no moinho planetário para alabastro. Soares e Guzzo (2019) avaliaram a moagem ultrafina à seco de quartzo natural em moinhos a jato e planetário e constataram que as alíquotas cominuídas em moinho a jato apresentavam um valor de  $d_{50}$  em até ~3 vezes menor que o valor do material moído no moinho planetário. Assim, é possível constatar que para um material de baixa dureza, como a gipsita, a aglomeração de ultrafinos se torna mais intensa na moagem em moinho planetário.

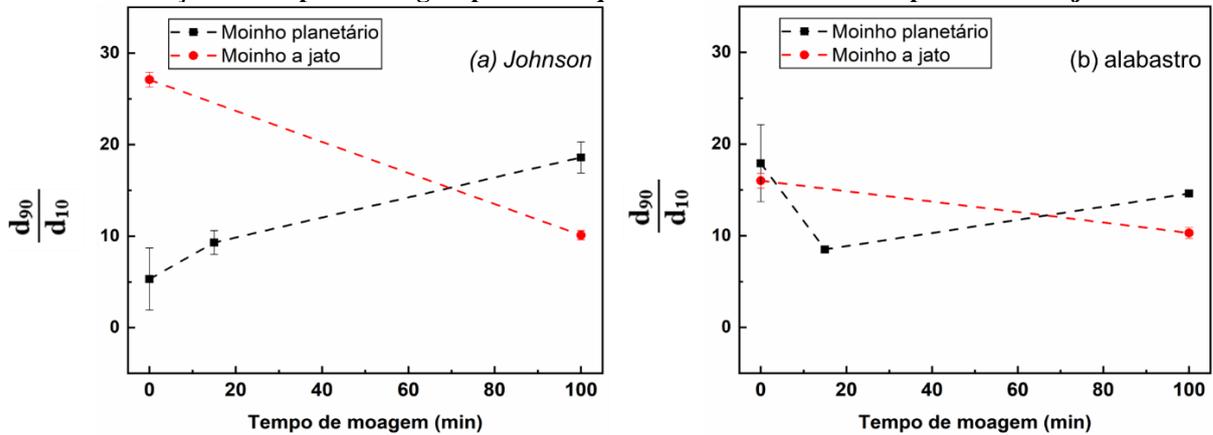
**Figura 13 - Diâmetro médio de partículas na faixa de 105x150  $\mu\text{m}$  de gipsita *Johnson* (a) e alabastro (b) em função do tempo de moagem para as alíquotas moídas nos moinhos planetário e a jato.**



Fonte: de autoria própria (2023).

A Figura 14 mostra a heterogeneidade da distribuição ( $d_{90}/d_{10}$ ) em função do tempo de moagem para as alíquotas moídas para a faixa de alimentação de 105x150  $\mu\text{m}$  no moinho planetário e a jato. Na Figura 14(a), a curva para o moinho planetário apresentou um comportamento crescente para todos os tempos de moagem investigados e a curva para o moinho a jato possui um comportamento oposto. Na Figura 14(b), a curva referente ao moinho a jato também apresentou um comportamento decrescente, porém a curva para o moinho planetário apresentou dois comportamentos, decrescente para o tempo de moagem de até 15 min e crescente a partir de 15 min. Para o tempo de moagem de 100 min as alíquotas moídas em moinho planetário apresentam maiores valores de  $d_{90}/d_{10}$  quando comparadas as alíquotas cominuídas em moinho a jato. A diferença dos valores do parâmetro é de ~2,0 vezes para *Johnson* e ~1,5 vezes para alabastro. Segundo Soares e Guzzo (2019), essa menor heterogeneidade obtida na moagem com moinho a jato do tipo espiral pode ser explicada pela presença do vórtice na câmara de moagem que atua como um classificador de partículas.

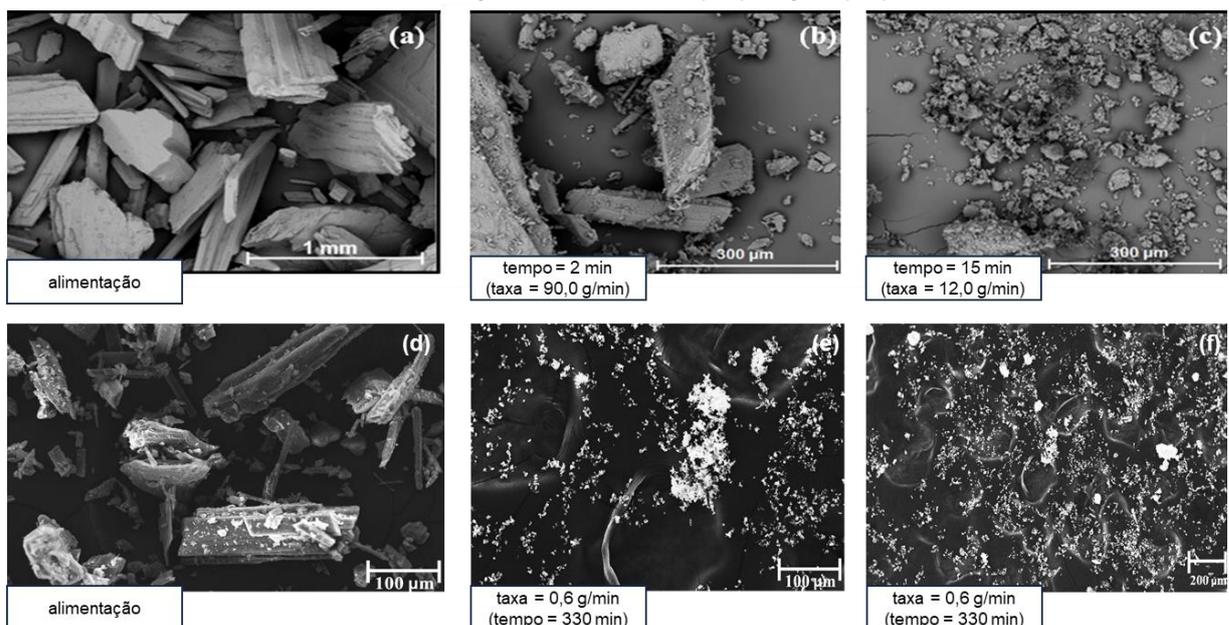
**Figura 14 - Heterogeneidade da distribuição de gipsita *Johnson* (a) e alabastro (b) na faixa de 105x150  $\mu\text{m}$  em função do tempo de moagem para as alíquotas moídas nos moinhos planetário e a jato.**



Fonte: de autoria própria (2023).

A Figura 15 apresenta as imagens de MEV das alíquotas de gipsita alabastro referentes as faixas 417x813  $\mu\text{m}$  e 75x105  $\mu\text{m}$  das alíquotas de alimentação e cominuídas em moinhos planetário e a jato, respectivamente. É possível observar para as alíquotas cominuídas em moinho planetário a evidência da presença de aglomerados para o tempo de 15 min. Enquanto para o material cominuído em moinho a jato, as imagens comprovam a existência apenas de partículas ultrafinas sem evidenciar efeito de possíveis aglomerações. Além disso, para ambas as amostras cominuídas, seja em moinho planetário ou a jato, constata-se a redução ou completa perda do hábito fibroso.

**Figura 15 - Imagens de MEV das alíquotas de alimentação e do produto das moagens de gipsita alabastro em moinhos planetário de bolas (a-c) e a jato (d-f).**

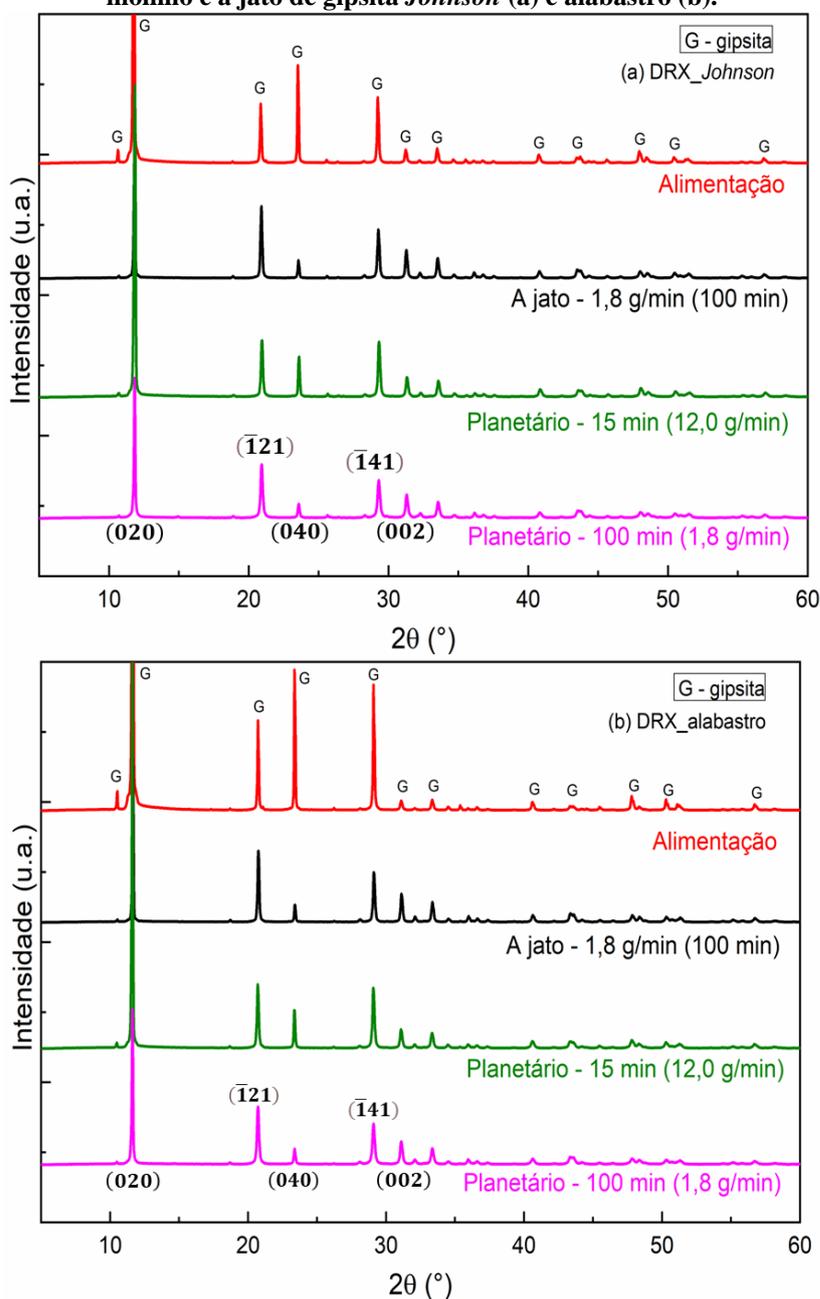


Fonte: adaptado de Guzzo *et al* (2022).

#### 4.4 Análise estrutural dos produtos das moagens

A Figura 16 apresenta os difratogramas de raios X da alimentação e das amostras moídas em moinhos planetário e a jato. De forma qualitativa, observa-se que os picos relativos aos planos (040) e  $(\bar{1}41)$  apresentam uma redução significativa de intensidade da alíquota de alimentação quando comparadas as intensidades dos picos das alíquotas moídas. Essas reduções podem estar associadas às possíveis distorções causadas pela moagem de alta energia na estrutura cristalina do material.

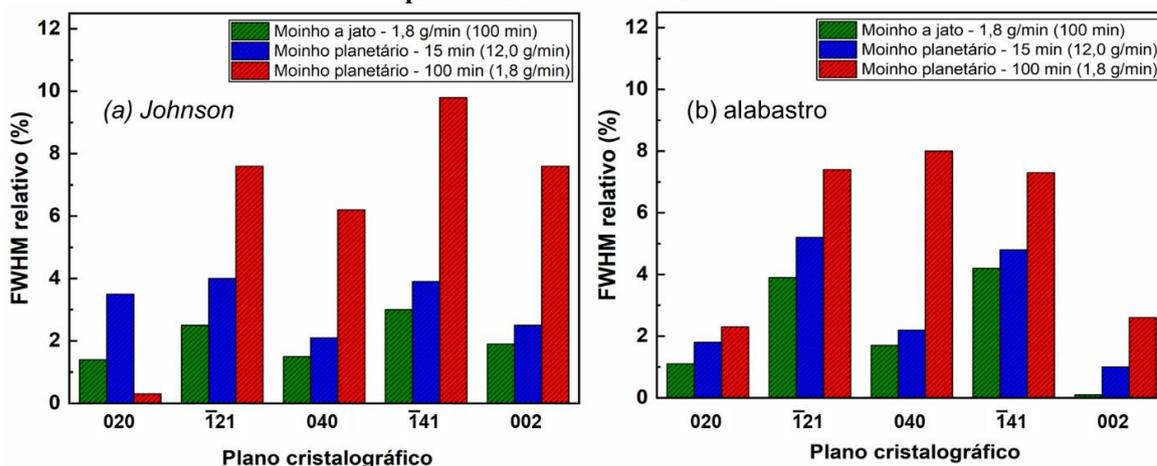
Figura 16 - Difratogramas de raios X da alimentação e das amostras moídas em moinho planetário e moinho a jato de gipsita *Johnson* (a) e alabastro (b).



Fonte: de autoria própria (2023).

A Figura 17 apresenta a variação relativa do FWHM para os picos de difração relacionados aos planos cristalográficos (020), ( $\bar{1}21$ ), (040), ( $\bar{1}41$ ) e (002) para os materiais moídos na faixa de alimentação de 105x150  $\mu\text{m}$  em moinhos a jato e planetário com tempos de moagem de 15 e 100 min. Os valores de FWHM para as alíquotas moídas em moinho planetário são sempre maiores quando comparados ao material moído em moinho a jato, exceto para o plano (020), de gipsita *Johnson*. É possível que este menor valor obtido seja devido a alguma influência durante a preparação das amostras pois apenas foi evidenciado essa menor medida no plano de maior espaçamento. A tendência de obter menores valores de FWHM na moagem em moinho a jato é explicada devido ao princípio operacional do moinho que resulta na saída do material da câmara de moagem logo após a fragmentação partícula-partícula. Além disso, o aumento de FWHM comprova que a moagem está induzindo modificações nas estruturas cristalinas das gipsitas. Ressalta-se que os planos ( $\bar{1}41$ ) e (002) obtiveram um maior FWHM relativo para a gipsita *Johnson* quando comparada a alabastro. Soares e Guzzo (2019) chegaram a identificar valores relativos de FWHM superiores a 30% associados aos picos de difração do quartzo das alíquotas moídas em moinho planetário. Dessa maneira, evidencia-se a influência das propriedades físicas e mecânicas do material cominuído sobre a sensibilidade da intensidade da largura à meia altura dos picos de difração.

Figura 17 - FWHM relativo à alimentação de gipsita *Johnson* (a) e alabastro (b) nos moinhos a jato e planetário durante 15 e 100 min.



Fonte: de autoria própria (2023).

## 5. CONCLUSÃO

Para a moagem em moinho a jato, os resultados deste trabalho mostraram que as variedades de gipsita *Johnson* e alabastro apresentam os diâmetros médios de partículas do

produto de moagem com valores estatisticamente iguais e granulometria ultrafina ( $d_{50} < 3,5 \mu\text{m}$ ) quando submetidos a uma taxa de moagem aproximada ( $\sim 1,8 \text{ g/min}$ ) para todas as faixas granulométricas estudadas entre 50 e 150  $\mu\text{m}$ . As imagens de microscopia eletrônica de varredura evidenciaram a total perda do hábito fibroso da gipsita alabastro após a moagem. Além disso, não foi observada a presença da aglomeração de ultrafinos.

A moagem em moinho planetário resultou em modificações morfológicas e estruturais das partículas em ambas as variedades. A aglomeração de ultrafinos foi evidenciada para tempos de moagem prolongados, ou seja, superiores a 15 min. As partículas moídas chegaram a aumentar até aproximadamente 4 vezes o valor do diâmetro médio das partículas de alimentação. Comparando as duas variedades, foi constatado que as alíquotas cominuídas de gipsita alabastro apresentaram maiores valores dos diâmetros característicos quando comparadas às de *Johnson*. Por sua vez, as imagens de MEV comprovaram a formação dos aglomerados no material.

Com relação as modificações estruturais induzidas pela moagem de alta energia, verificou-se distorções na estrutura cristalina mais intensas na moagem em moinho planetário por meio dos maiores valores obtidos de largura à meia altura do pico de difração para a maioria dos planos de difração estudados devido ao maior tempo de permanência das partículas nos potes de moagem.

Dessa maneira, as análises conjuntas dos resultados permitem concluir que a utilização do moinho a jato é recomendada para a produção de gipsita ultrafina *Johnson* e alabastro a partir de granulometria fina de alimentação pois proporciona uma excelente distribuição granulométrica, uma ausência de aglomeração e uma menor modificação da estrutura cristalina. Para os tempos equivalentes estudados, o moinho planetário não se mostrou recomendado para o processamento de partículas ultrafinas devido ao significativo impacto da aglomeração no material.

## REFERÊNCIAS

BALTAR, C.A.M.; BASTOS, F.F.; LUZ, A.B. **Gipsita. In: Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações.** Editora do CETEM. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro. Cap. 23. pp. 505-526. 2008.

BARROS, F.B.M. **Caracterização dimensional, morfológica e estrutural de partículas de calcário e dolomito cominuídas em moinho planetário e o estudo da aglomeração de ultrafinos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BATISTA LEAL, S.O. **Moagem de minerais industriais em moinhos de alta energia: o problema da aglomeração de partículas ultrafinas.** Relatório Bolsista de Iniciação Científica. 2018

BELL, F.G. **A survey of the engineering properties of some anhydrite and gypsum from the north and midlands of England.** Engineering Geology, [s.l.], v. 38, n. 1-2, p.1-23. Elsevier BV. Dezembro, 1994.

BURMEISTER, C. F.; KWADE, A. **Process engineering with planetary ball mills.** Chemical Society Reviews, v. 42, n. 18, p. 7660, 2013.

CANUT, M.M.C. **Estudo da Viabilidade do Uso do Resíduo Fosfogeno como Material de Construção.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

CHAMAYOU, A.; DODDS, J.A. **Chapter 8: Air Jet Milling. Particle Breakage,** [s.l.], p.421-435. Elsevier BV. Dezembro, 2007.

GUZZO, P.L.; SANTOS, J.B.; TINO, A.A.A. **The onset of particle agglomeration during the dry ultrafine grinding of limestone in a planetary ball mil.** Powder Technology, v. 284, pp. 122-129. Novembro, 2015.

GUZZO, P.L.; BARROS, F.B.M.; SOARES, B.R.; SANTOS, J.B. **Evaluation of particle size reduction and agglomeration in dry grinding of natural quartz in a planetary ball mil.** Powder Technology, v. 368, pp. 149-159. Maio, 2020.

GUZZO, P.L.; TINO, A.A.A.; IDELFONSO, M.L; SANTOS, J.B.; SOARES, B.R; BARROS, F.B.M. **Moagem de alabastro utilizando moinhos planetário e a jato: parâmetros operacionais e efeito do hábito cristalino.** In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Armação dos Búzios. Setembro, 2022.

IDELFONSO, M.L. **Moagem de gipsita em moinho a jato: adequação de parâmetros operacionais e efeito do hábito cristalino na produção de ultrafinos.** Relatório Bolsista de Iniciação Científica – CNPq - UFPE. 2021.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais.** 23<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Bookman, v. 53. 2012.

KING, R.P. **Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems.** Ed: Butterworth-Heinemann, v. 1, pp. 127-151. 2001.

LYRA SOBRINHO, A.C.P.; DANTAS, J.O.C. **Gipsita**. 29. ed. [s.i.]: Departamento Nacional de Produção Mineral. 104 p. 29 v. pp 54-55. 2009.

MARTINS, F.S. **Obtenção de gesso tipo beta a partir de gipsita alabastro com granulometria ultrafina: análise da viabilidade técnica**. Relatório Bolsista de Iniciação Científica – CNPq - UFPE. Setembro, 2023.

OLIVEIRA, F.M.C. et al. **Características mineralógicas e cristalográficas da gipsita do Araripe**; Holos, ano 28, vol. 4. 2012.

SOARES, B.R. **Estudo Comparativo da Moagem Ultrafina de Quartzo em Moinhos de Alta Energia**. Monografia. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

SOARES, B.R.; GUZZO, P.L. **Moagem ultrafina de quartzo natural em moinhos de alta energia: um estudo comparativo**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belo Horizonte, 2019.

SURYANARAYANA, C. **Mechanical Alloying and Milling**. New York: Pergamon. v. 46. Janeiro, 2001.

TINO, A.A.A. **Moagem Ultrafina de Gipsita em Moinho Planetário de Bolas: Caracterização Dimensional, Morfológica e Estrutural do Estado Particulado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

WELLENKAMP, F. J. **Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 56 p. 1999.

ZHANG, Q.; KASAI, E.; SAITO, F. **Mechanochemical changes in gypsum when dry ground with hydrated minerals**. Powder Technology, [s.l.], v. 87, n. 1, p.67-71. Elsevier BV. Abril, 1996.