



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



**João Vítor Karlburger**

**APROVEITAMENTO DE REJEITO DA CONCENTRAÇÃO DE  
PEGMATITO LITINÍFERO NA FABRICAÇÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS**

**Ouro Preto**

**2025**

**João Vítor Karlburger**

**APROVEITAMENTO DE REJEITO DA CONCENTRAÇÃO DE  
PEGMATITO LITINÍFERO NA FABRICAÇÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro de Minas.

**Orientadora:** MSc. Mariana Caroline Andrade Silva

**Co-orientadora:** Dr<sup>a</sup>. Érica Linhares Reis

**Ouro Preto**

**2025**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

K185a Karlburger, João Victor.

Aproveitamento de rejeito da concentração de pegmatito litinífero na fabricação de materiais cerâmicos. [manuscrito] / João Victor Karlburger. - 2025.

53 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Dra. Mariana Caroline Andrade Silva.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério - Fundentes. 2. Rejeitos (Metalurgia). 3. Lítio. 4. Cerâmica (Tecnologia). I. Silva, Mariana Caroline Andrade. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.79

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**João Víctor Karlburger**

### **Aproveitamento de rejeito da concentração de pegmatito litífero na fabricação de materiais cerâmicos**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 10 de abril de 2025

#### Membros da banca

MSc. Mariana Caroline Andrade Silva - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr<sup>a</sup> Érica Linhares Reis - Co-orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Dr<sup>a</sup> Janine Rodrigues Figueiredo (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Eng<sup>o</sup> de Minas Lucas Jean Wurzner (Universidade Federal de Ouro Preto)

MSc. Mariana Caroline Andrade Silva, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/04/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Mariana Caroline Andrade Silva, TECNICO EM MINERACAO**, em 23/04/2025, às 09:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0899152** e o código CRC **2C886EE6**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Roberto e Renta, pelo apoio incondicional e pela confiança em minha jornada acadêmica. Vocês sempre foram a base da minha motivação, oferecendo amor, orientação e, principalmente, sempre acreditando em mim. À minha irmã Julia e meu irmão Arthur, agradeço pela companhia, pelo carinho e por estarem sempre ao meu lado, tornando os desafios mais leves e as vitórias mais alegres.

À Fabiana, minha namorada, é uma pessoa essencial na minha vida. Agradeço a você pelo suporte emocional, pelo incentivo nos momentos difíceis e pelo carinho constante. Seu amor e compreensão tornaram esse percurso acadêmico mais significativo e me deram forças para seguir em frente. Agradeço por sempre me apoiar em todos os aspectos da minha vida.

Sou grato aos professores da UFOP, especialmente aos do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN), pela orientação técnica e pela contribuição significativa ao meu crescimento acadêmico. A Escola de Minas tem sido uma parte fundamental da minha formação, e agradeço a todos os envolvidos no meu desenvolvimento.

À minha orientadora, Mariana, sou profundamente grato pela confiança e pelo apoio nos trabalhos de iniciação científica. Sua orientação, paciência e sempre estar disponível para tirar dúvidas me ajudaram a construir o caminho para esse trabalho de conclusão de curso. O aprendizado que tive sob sua supervisão foi essencial para meu crescimento como profissional e como ser humano.

Agradeço de forma especial aos professores Hernani, Carlos Alberto Pereira, Allan e Erica, que com sua vasta experiência e dedicação contribuíram enormemente para o meu desenvolvimento acadêmico. Suas aulas e orientações foram fundamentais para ampliar meu conhecimento técnico e científico, e me ajudaram a consolidar minha visão crítica e a capacidade de aplicar o que aprendi em situações reais. Sou muito grato pela disponibilidade e pelo compromisso de todos com a minha formação.

Muito obrigado a todos por tornarem essa jornada mais enriquecedora e significativa!

## RESUMO

A crescente demanda por lítio, impulsionada pela transição energética e pela expansão dos mercados de baterias para veículos elétricos e dispositivos eletrônicos, tem ampliado significativamente a produção mineral do elemento e, com ela, a geração de grandes volumes de rejeitos, especialmente oriundos do processo de flotação. Esses resíduos representam um passivo ambiental relevante e despertam interesse quanto à sua possível reutilização em aplicações industriais, visando práticas sustentáveis e alinhadas à economia circular. Neste contexto, o presente estudo tem como proposta a caracterização de uma amostra de rejeito da produção de lítio proveniente do processo de flotação, com o objetivo de avaliar seu potencial para a fabricação de cerâmica branca. A caracterização da amostra de rejeito envolveu ensaios de análise granulométrica, química e mineralógica. Os corpos de prova foram confeccionados com diferentes proporções de rejeito (0%, 5%, 10%, 20% e 30%) e avaliados quanto à retração linear, limites de Atterberg, massa específica aparente, absorção de água, perda ao fogo e resistência à compressão uniaxial. A amostra revelou-se composta principalmente por quartzo, albita, microclina, muscovita e espodumênio, com distribuição granulométrica adequada ao processamento cerâmico ( $d_{80}$  de 167,36  $\mu\text{m}$ ). Quanto à composição cerâmica, os resultados demonstraram que a adição do rejeito contribuiu para a redução da porosidade e aumento da densidade das peças, com diminuição da absorção de água (de 18,88% para 13,31%) e aumento da massa específica aparente (de 1,88  $\text{g/cm}^3$  para 2,31  $\text{g/cm}^3$ ). A perda ao fogo variou de forma inversamente proporcional à quantidade de rejeito, enquanto o índice de plasticidade caiu de 7,36% (argila pura) para 3,53% (30% de rejeito), o que pode ter comprometido a resistência mecânica dos corpos, observada por meio de deformações sem ruptura. Difractogramas indicaram menor teor de quartzo nos corpos sinterizados, o que pode ter contribuído para a fragilidade observada. Conclui-se que o rejeito estudado apresenta potencial para aplicação em cerâmica branca, desde que sejam realizados ajustes na formulação, para melhorar a trabalhabilidade e a resistência mecânica dos corpos cerâmicos.

Palavras-chave: Rejeito de minério de lítio; Cerâmica Branca; Fundente.

## ABSTRACT

The growing demand for lithium, driven by the energy transition and the expansion of battery markets for electric vehicles and electronic devices, has significantly increased the mineral production of this element and, consequently, the generation of large volumes of waste, especially from the flotation process. These residues represent a significant environmental liability and have raised interest regarding their potential reuse in industrial applications, aiming for sustainable practices aligned with the circular economy. In this context, the present study proposes the characterization of a lithium production waste sample obtained from the flotation process, with the objective of evaluating its potential for the manufacturing of white ceramics. The characterization of the waste sample involved particle size, chemical, and mineralogical analyses. Test specimens were produced with different proportions of waste (0%, 5%, 10%, 20%, and 30%) and evaluated in terms of linear shrinkage, Atterberg limits, apparent specific mass, water absorption, loss on ignition, and uniaxial compressive strength. The sample was found to be mainly composed of quartz, albite, microcline, muscovite, and spodumene, with a particle size distribution suitable for ceramic processing (d<sub>80</sub> of 167.36 μm). Regarding ceramic composition, the results showed that the addition of waste contributed to a reduction in porosity and an increase in the density of the pieces, with a decrease in water absorption (from 18.88% to 13.31%) and an increase in apparent specific mass (from 1.88 g/cm<sup>3</sup> to 2.31 g/cm<sup>3</sup>). The loss on ignition varied inversely with the amount of waste, while the plasticity index decreased from 7.36% (pure clay) to 3.53% (30% waste), which may have compromised the mechanical strength of the specimens, as evidenced by deformations without rupture. X-ray diffractograms indicated a lower quartz content in the sintered bodies, which may have contributed to the observed fragility. It is concluded that the studied waste has potential for application in white ceramics, provided that adjustments are made to the formulation to improve the workability and mechanical strength of the ceramic bodies.

Keywords: Lithium ore tailings; White ceramics; Flux.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da reorganização das partículas durante a secagem da cerâmica. ....	17
Figura 2 - Fluxograma da Produção .....	18
Figura 3 - Produção global de revestimentos cerâmicos por continente.	20
Figura 4 - Corpo de Prova Após Sinterização.....	28
Figura 5 - Análise Granulométrica .....	32
Figura 6 - Difratoograma de amostra de rejeito de minério de lítio .....	33
Figura 7 - Termograma da amostra .....	35
Figura 8 - Difratoograma de raio X da argila em estudo .....	37
Figura 9 - Corpo de Prova Após Prensagem .....	39
Figura 10 - Resistência à Compressão Uniaxial .....	40
Figura 11 - Análise Mineralógica .....	41
Figura 12 - Absorção de Água .....	42
Figura 13 - Perda ao Fogo.....	43
Figura 14 - Massa Específica Aparente .....	43
Figura 15 - Retração de Queima .....	44

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de cerâmica e suas características físicas.....	13
Tabela 2 - Parâmetros para aplicação como Cerâmica Branca.....	19
Tabela 3 - Caracterização da matéria prima (Argila). ....	26
Tabela 4 - Peso Específico Medido .....	34
Tabela 5 - Análise Química.....	36
Tabela 6 - Limites de Atterberg.....	38

## Sumário

1	Introdução .....	10
2	OBJETIVOS .....	11
2.1	Objetivos Gerais.....	11
2.2	Objetivos Específicos .....	11
3	Revisão BIBLIOGRÁFICA .....	12
3.1	Cerâmica Branca.....	12
3.1.1	Produção da Cerâmica Branca .....	13
3.1.2	Produtos e números da produção de cerâmica branca.....	18
3.2	Utilização de rejeitos na fabricação de cerâmica .....	20
3.3	Cadeia produtiva do lítio.....	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1	Caracterização do Rejeito de Lítio .....	25
4.1.1	Análise Granulométrica .....	25
4.1.2	Análise Mineralógica .....	25
4.1.3	Determinação Peso específico.....	25
4.1.4	Análise Termogravimétrica.....	25
4.1.5	Área Superficial (BET) .....	26
4.1.6	Análise Química .....	26
4.2	Caracterização da Argila .....	26
4.2.1	Análise Mineralógica .....	27
4.3	Ensaio De Corpos Cerâmicos .....	27
4.3.1	Confecção dos Corpos de Prova .....	27
4.3.2	Ensaio tecnológicos para caracterização dos corpos cerâmicos	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	32

5.1	Caracterização do Rejeito de Lítio .....	32
5.1.1	Análise Granulométrica .....	32
5.1.2	Análise Mineralógica .....	32
5.1.3	Determinação do Peso Específico .....	34
5.1.4	Análise Termogravimétrica.....	34
5.1.5	Área Superficial (BET) .....	35
5.1.6	Análise Química .....	36
5.2	Análise mineralógica da argila.....	37
5.3	Ensaio para caracterização dos corpos cerâmicos .....	37
5.3.1	Limites De Atterberg .....	38
5.3.2	Resistência à Compressão Uniaxial (RCU) .....	38
5.3.3	Absorção de Água (AA) .....	41
5.3.4	Perda ao Fogo (PF) .....	42
5.3.5	Massa Específica Aparente .....	43
5.3.6	Retração Linear De Secagem (RLS) e de Queima (RLQ) ..	44
6	CONCLUSÃO.....	46
6	Referências Bibliográficas .....	49

## 1 INTRODUÇÃO

O lítio, elemento químico leve e altamente reativo, tem-se tornado cada vez mais essencial para a indústria moderna, especialmente no contexto da transição energética (BRAGA e SAMPAIO, 2008). Sua aplicação em baterias de íon-lítio, utilizadas em dispositivos eletrônicos portáteis e veículos elétricos, impulsiona a demanda por este metal e, conseqüentemente, a necessidade de sua extração em larga escala (MARTINS, 2011; USGS, 2024).

No entanto, a extração de lítio a partir de pegmatitos litiníferos, uma das principais fontes do mineral, gera grandes volumes de rejeitos, compostos por minerais como quartzo, feldspatos e micas (NANDIHALLI et al., 2024). O descarte inadequado desses rejeitos pode acarretar sérios impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água, além da ocupação de grandes áreas para armazenamento (FOSU, 2022).

Diante desse cenário, a busca por alternativas sustentáveis para o aproveitamento desses rejeitos torna-se crucial. A indústria cerâmica, que utiliza matérias-primas como argila, quartzo e feldspato, apresenta-se como um setor promissor para a aplicação desses resíduos (MOTTA *et al.*, 2001). O reaproveitamento de rejeitos na fabricação de cerâmica pode contribuir para a redução do consumo de matérias-primas virgens, a minimização dos impactos ambientais da mineração e a agregação de valor a um subproduto que, de outra forma, seria descartado (SOUZA, 2007).

Este trabalho propõe investigar o potencial de aproveitamento do rejeito da concentração de pegmatito litinífero na fabricação de cerâmica branca. A pesquisa busca caracterizar o rejeito, avaliar seu comportamento em massas cerâmicas e determinar a influência de sua adição nas propriedades dos produtos. Espera-se que os resultados deste estudo possam contribuir para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis na indústria cerâmica e para a valorização de resíduos da mineração de lítio.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

Caracterizar uma amostra de rejeito proveniente da flotação de pegmatito litinífero oriunda da exploração de depósitos localizados na região de São João Del Rei (MG) e avaliar a aplicação deste rejeito como matéria-prima fundente na produção de cerâmica branca.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- a) Caracterizar sob o ponto de vista mineralógico, granulométrico e químico, além de ensaios quanto à decomposição termogravimétrica uma amostra de rejeito da flotação de minério de lítio;
- b) Produzir corpos de prova variando a proporção de incorporação do rejeito de lítio nas composições (0%, 5%, 10%, 20% e 30%), mantendo constante a pressão de compactação (28 MPa), condição de secagem (110°C – 24 horas) e a temperatura de sinterização (1100 °C);
- c) Caracterizar tecnologicamente os produtos cerâmicos obtidos com base em parâmetros como: retração linear na secagem e queima, resistência à compressão uniaxial, absorção de água, perda ao fogo, massa específica aparente;
- d) Caracterizar as composições com 0 e 30% de incorporação do rejeito quanto aos índices de trabalhabilidade, quantificados de acordo com os Limites de Atterberg.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Cerâmica Branca

O termo "cerâmica brancas" refere-se a uma categoria de materiais cerâmicos caracterizados por uma coloração clara após a queima, variando entre branca, creme e acinzentada. Esses produtos apresentam alta densidade, brilho vítreo e podem ser esmaltados, com acabamento translúcido ou opaco. Sua composição típica é baseada em uma mistura de matérias-primas naturais e amplamente disponíveis, como caulim, quartzo e feldspato, que conferem as propriedades desejáveis ao material (BRAGANÇA *et al.*, 2019).

Uma classificação comum para a cerâmica branca é baseada na quantidade de água absorvida pelo corpo cerâmico, o que indica a porosidade do material. Essa classificação é feita em três categorias (Tabela 1): a) porcelana, que apresenta uma absorção de água de 0 a 0,5% (absorção praticamente inexistente, caracterizando corpos mais densos e compactos); b) grês, com absorção entre 0,5% e 3% (considerada baixa absorção, resultando em corpos cerâmicos com boa resistência e durabilidade); e c) louça, que possui absorção superior a 3% (corpos mais porosos, com maior capacidade de retenção de água) (SOUZA, 2007).

As porcelanas são produzidas a partir de composições cerâmicas formadas por argilominerais, como argila plástica e caulim, além de quartzo e feldspato de alta pureza, sendo submetidas a queimas em temperaturas acima de 1250 °C. Os materiais resultantes possuem porosidade praticamente nula e englobam diferentes tipos, como a porcelana de uso doméstico e para hotelaria (pratos, xícaras, conjuntos de chá etc.); a porcelana elétrica, utilizada em isoladores e componentes eletroeletrônicos; e a porcelana técnica, caracterizada por sua alta resistência mecânica ou química (MOTTA *et al.*, 2001)

A produção de grês utiliza matérias-primas como argilas, sílicas, feldspato, carbonato de cálcio e, em alguns casos, rochas cerâmicas (granito, pegmatito, filito) como fundentes, dispensando o uso de feldspato puro. Após queima em torno de 1250 °C, o material apresenta baixa absorção de água (0,5% a 3%),

sendo amplamente empregado na fabricação de louças sanitárias e artigos de higiene. Segundo Zimmer *et al* (2019), o grês pode ser classificado em: grês comum (absorção  $\leq 3\%$ , aspecto opaco e textura áspera); grês natural (argila não processada, estilo rústico e cores escuras); grês fino (argilas processadas, tonalidades claras e absorção  $\leq 0,5\%$ ); grês porcelanato (absorção  $< 0,5\%$ , alta resistência mecânica, usado em revestimentos); e grês técnico (absorção  $< 0,5\%$ , aplicado em cerâmicas laboratoriais e isoladores de baixa tensão).

Os produtos de faiança possuem composições semelhantes às do grês, mas se diferenciam pela incorporação de fundentes carbonáticos, como calcita e dolomita. Fabricados em temperaturas inferiores a  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , apresentam maior porosidade (absorção de água  $> 3\%$ ) e menor resistência mecânica quando comparados ao grês e às porcelanas. Entre os principais itens produzidos estão as peças utilitárias e decorativas, como jogos de jantar, conjuntos de chá, xícaras, canecas e objetos ornamentais (MOTTA *et al*, 2001).

Tabela 1 - Tipos de cerâmica e suas características físicas

Tipo de cerâmica	Matérias-primas	Temperatura de queima	Coloração	Absorção de água	Resistência
Grês	Argilas, sílicas, caulinita e feldspato	Aproximadamente $1250^{\circ}\text{C}$		Entre 0,5 e 3%	Entre 25 e 50MPa
Faiança	Argilas, sílicas, calcita, dolomita	$<1250^{\circ}\text{C}$	Opaca e não vítrea	$>3\%$	Entre 25 e 50MPa
Porcelana	Argila plástica, caulim, quartzo e feldspato de alta pureza	$>1250^{\circ}\text{C}$	Branca, ligeiramente acinzentada, um pouco azulada	Entre 0 e 0,5%	Pode alcançar 80MPa

Fonte: Adaptado de Rezende *et al*. (2024)

### 3.1.1 Produção da Cerâmica Branca

Segundo Motta (2002), as massas cerâmicas tradicionais, de base argilosa, incluem a cerâmica vermelha, branca e de revestimentos, sendo fundamentais na composição dos corpos cerâmicos, também chamados de biscoitos ou suportes. Essas massas podem ser classificadas em simples (ou naturais) e compostas (ou artificiais). As massas simples são formadas por uma

única matéria-prima, geralmente argila, podendo incluir misturas de diferentes tipos de argilas ou materiais argilo-arenosos. Já as massas compostas envolvem a combinação de várias matérias-primas, como argila, feldspato e sílica, para atender a requisitos específicos de resistência e estética, como nas massas triaxiais.

As matérias-primas que compõem, principalmente a massa cerâmica composta, podem ser classificadas em dois grupos principais: materiais plásticos e materiais não plásticos. Os materiais plásticos, como argilas e caulins, são essenciais para processos de fabricação, incluindo extrusão, torneamento e prensagem, pois garantem a deformabilidade necessária e conferem trabalhabilidade e resistência mecânica adequadas durante a conformação do corpo cerâmico (MOTTA, 2002). Além disso, a plasticidade influencia etapas como secagem e transporte, sendo um fator determinante na prevenção de defeitos, como trincas e ondulações (ZIMMER & GOMES, 2019).

O caulim cerâmico desempenha um papel fundamental na fabricação de produtos de alto valor agregado, sendo a principal matéria-prima de natureza plástica. Sua participação nas formulações cerâmicas para sanitários, esmaltações, porcelanas decorativas e de mesa, porcelana eletrotécnica, pisos, revestimentos e grés varia entre 10% e 40%, sendo associado ao quartzo (20-30%) e aos feldspatos (até 30%) (GALÁN, 2006).

Já os materiais não plásticos atuam de forma complementar, contribuindo tanto nas etapas de conformação e secagem quanto no processamento térmico. Durante a secagem, esses materiais ajudam a reduzir a retração das peças, minimizando deformações e trincas. No entanto, é durante a queima que os materiais não plásticos assumem seu papel mais relevante, atuando no controle das transformações de fase, na minimização de deformações e na promoção da sinterização, processo essencial para a obtenção das propriedades finais do produto cerâmico (MOTTA, 2002).

Os minerais não plásticos podem ser classificados conforme sua função na massa cerâmica. Os fundentes, como feldspatos, feldespatoídes, calcita e dolomita, reduzem a temperatura de fusão, favorecendo a formação de fases líquidas e cristalinas, o que melhora a coesão entre as partículas e contribui para

a resistência do material. Já os inertes, como quartzo e areias silicosas, mantêm sua estrutura estável durante a queima, auxiliando no controle da dilatação térmica e na estabilidade dimensional. Além disso, óxidos de ferro e outros elementos (Cu, Co, Mn, Ti, etc.) podem atuar como pigmentos e, em certas condições, também como fundentes (GALÁN, 2006).

Segundo Guimarães, Araújo e Santos (2015), a cerâmica branca é composta por argilas com baixo teor de óxido de ferro, o que reduz a coloração avermelhada típica de outras cerâmicas e confere ao material uma tonalidade mais clara após a sinterização. Entretanto, mesmo em cerâmicas com baixo teor de ferro, a presença desse elemento pode levar a efeitos indesejáveis durante a queima.

Durante o processamento térmico das cerâmicas, a decomposição da matéria orgânica gera agentes redutores, como carbono (C) e monóxido de carbono (CO), que reduzem os óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) presentes na argila a formas mais escuras, como magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e wustita (FeO). Essa redução forma o coração negro, uma mancha escura no interior da cerâmica, que compromete a estética e, em alguns casos, a qualidade do produto. O fenômeno é agravado por altos teores de matéria orgânica e ferro, além de ciclos de queima mal controlados (OLIVEIRA, 2021).

Além do óxido de ferro, outros contaminantes minerais incluem pirita, siderita, minerais de titânio, gipsita e dolomita. Suas características, como forma, tipo e quantidade, podem influenciar o uso da argila, as etapas de processamento e sua aplicação na indústria cerâmica (MOTTA, 2008).

De acordo com Jordão (1988), a produção de cerâmica pode ser dividida em três etapas principais: a preparação das matérias-primas, que envolve a cominuição e a mistura dos materiais; a conformação do corpo cerâmico, realizada por processos como extrusão, prensagem e/ou colagem; o tratamento térmico ou sinterização; e, por fim, o acabamento do produto.

Os grãos apresentam irregularidades, tornando necessário o ajuste da matéria-prima por meio dos processos de moagem e atomização antes das etapas de manuseio e conformação. Esse processo é fundamental, pois a uniformidade granulométrica garante a qualidade da peça final, reduzindo a

ocorrência de defeitos. A moagem, também conhecida como maceração, tem a função de reduzir e uniformizar o tamanho das partículas, contribuindo para a regularidade do material (GUIMARÃES *et al*, 2015).

As massas cerâmicas são formuladas a partir da combinação controlada de matérias-primas, aditivos e água, garantindo uniformidade física e química. A dosagem precisa dos componentes é essencial para a qualidade do produto final, exigindo controle rigoroso da umidade e do peso seco de cada material. Dependendo da técnica de conformação, as massas podem ser classificadas em três tipos: suspensão (barbotina), usada para moldagem em gesso ou resina porosa; massas secas ou semi-secas, na forma granulada, para prensagem; e massas plásticas, de consistência maleável, utilizadas em extrusão, torneamento ou prensagem. (CETESB *et al*, 1999).

A quantidade de água na massa depende do processo de conformação escolhido, influenciando diretamente tanto o processo quanto o resultado das peças. O controle da água é afetado pela composição da argila, sua estrutura, aditivos na mistura e outros fatores. Argilas como o caulim e as refratárias, que suportam altas temperaturas, geralmente requerem menos água para adquirir plasticidade, enquanto as argilas plásticas precisam de um pouco mais (GUIMARÃES *et al*, 2015).

Dessa forma, existem diversos processos para moldar as peças cerâmicas, e a escolha do método ideal depende de fatores econômicos, da geometria e das características do produto. Os mais comuns incluem colagem, prensagem, extrusão e torneamento. A colagem ou fundição envolve o preenchimento de um molde com barbotina, formando as paredes da peça ao perder água para o molde. A fundição sob pressão em moldes de resina porosa também tem sido mais utilizada. A extrusão empurra a massa cerâmica através de um bocal, criando formas específicas, enquanto na prensagem, usa-se alta pressão para compactar a massa (ABCERAM, 2025).

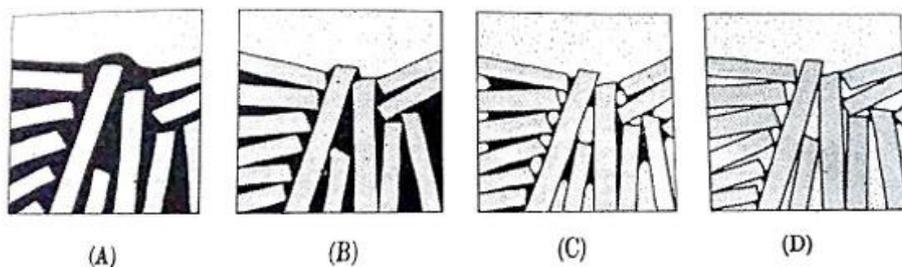
Após a conformação, as peças geralmente retêm uma quantidade significativa de água devido à preparação da massa. Para evitar problemas como trincas, bolhas e empenos, é essencial remover essa água de maneira lenta e controlada até atingir um teor residual de umidade entre 0,8% e 5%. Isso ajuda

a evitar tensões internas que podem comprometer a integridade do produto (CETESB *et al*, 1999).

Durante a secagem, a remoção gradual da água promove a reaproximação das partículas constituintes da massa cerâmica, reduzindo os espaços vazios e favorecendo um empacotamento mais eficiente. Esse adensamento progressivo intensifica as interações intermoleculares, aumentando a coesão entre as partículas e resultando em um material estruturalmente mais resistente. À medida que a umidade diminui, as forças de atração entre as partículas se tornam mais expressivas, contribuindo para a rigidez da peça antes mesmo da etapa de sinterização. Esse fenômeno é fundamental para a integridade mecânica do produto, minimizando fragilidades e preparando a estrutura para as fases subsequentes do processamento (PUKASIEWICZ, 2001).

O fenômeno de empacotamento das partículas durante a secagem pode ser visualizado na FIGURA 1. No início (A), há um alto teor de umidade, com espaços vazios preenchidos por líquido. Conforme a secagem avança (B, C), as partículas se aproximam gradualmente devido à remoção da água, resultando em um empacotamento mais eficiente. No estágio final (D), observa-se uma estrutura mais densa, indicando o aumento das forças de atração e da resistência mecânica da peça.

Figura 1 - Representação esquemática da reorganização das partículas durante a secagem da cerâmica.

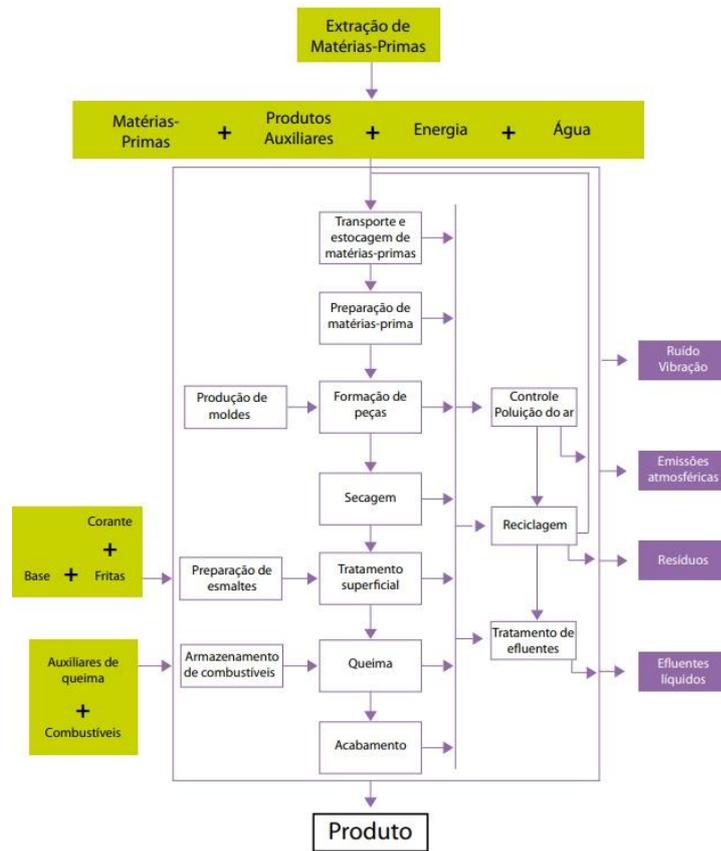


Fonte: NORTON, 1973

O fluxograma apresentado na FIGURA 2 ilustra o processo de produção, desde a entrada de matérias-primas até o produto, destacando a importância do controle rigoroso dos processos. O controle ambiental, incluindo poluição do ar, reciclagem, tratamento de efluentes e gestão de resíduos, é essencial para

garantir a qualidade do produto, a eficiência da produção e a sustentabilidade. A próxima imagem aprofundará essas etapas do processo.

Figura 2 - Fluxograma da Produção de Cerâmica branca



Fonte: *Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Branca e de Revestimento* (2008)

### 3.1.2 Produtos e números da produção de cerâmica branca

O setor de cerâmica branca abrange uma ampla variedade de produtos, incluindo louças sanitárias e de mesa, porcelanas (utilitárias e decorativas), isoladores elétricos e cerâmicas técnicas, estas últimas desenvolvidas com propriedades específicas para aplicações industriais e tecnológicas de alta performance (MOTTA, 2001). Os principais parâmetros considerados na

avaliação da aplicação do caulim na indústria da cerâmica branca estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros para aplicação como Cerâmica Branca

<b>CERÂMICA BRANCA</b>	
<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
<b>%Caulinita</b>	75-85%
<b>Alvura</b>	85-92%
<b>Cor da queima a 110 °C</b>	Cinza – Cinza Escuro
<b>Cor da queima a 1150 °C</b>	Creme escuro – Branco
<b>Cor da queima a 1250 °C</b>	Cinza - Branco
<b>Granulometria</b>	20 – 40 % < 2 $\mu$ m
<b>Límite de Plasticidade (%)</b>	31,4 – 32,9
<b>Oxido de ferro</b>	< 0,9%

Fonte: SOUZA (2007) apud MARTINS (2021).

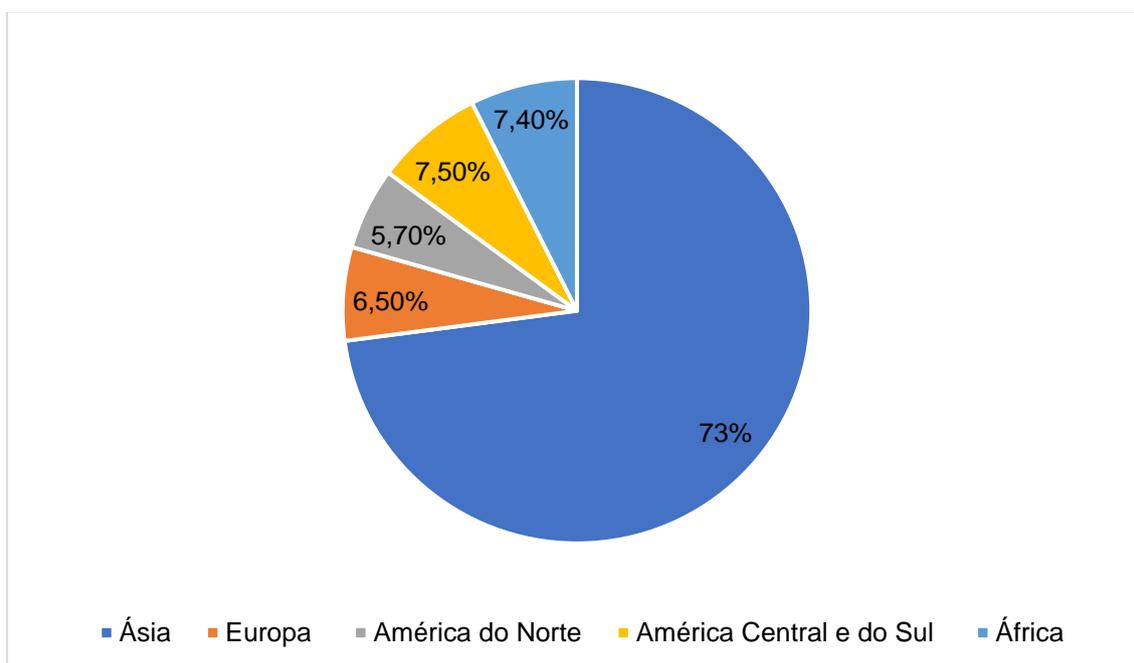
O Brasil exerce um papel fundamental no mercado de cerâmica e louça sanitárias, tanto no mercado interno quanto no mercado externo. Os números são bastante promissores, sendo o terceiro maior produtor mundial e o sexto maior exportador mundial com vendas para mais de 110 países. O setor produtivo corresponde a 6% do produto interno bruto (PIB) da indústria de materiais de construção (ANFACER,2022).

A produção de cerâmica branca, especialmente no segmento de revestimentos cerâmicos, apresenta números significativos no cenário global. Em 2022, a produção brasileira de revestimentos cerâmicos atingiu 927,2 milhões de metros quadrados (m<sup>2</sup>), representando uma redução de 11,6% em relação a 2021 (ANFACER,2022). O Brasil ocupa a 3<sup>a</sup> posição mundial em produção e consumo de revestimentos cerâmicos, além de ser o 6<sup>o</sup> maior exportador global (CERAMICS OF BRAZIL, [s.d.]).

O gráfico apresentado na FIGURA 3, ilustra a distribuição da produção global de revestimentos cerâmicos por região em 2023. Observa-se que a Ásia lidera com 73% do total produzido, apesar de ter registrado uma queda de 5% em relação ao ano anterior. A Europa teve a maior redução percentual, com 18% a menos, enquanto a América do Norte e a América Central e do Sul também apresentaram quedas de 7,7% e 10,3%, respectivamente. Em contraste, a África

foi a única região com crescimento, alcançando um aumento de 9,9%, impulsionado principalmente pelo Egito e Nigéria. (ANFACER, 2023).

Figura 3 - Produção global de revestimentos cerâmicos por continente.



Fonte: Adaptado de ANFACER (2023).

### 3.2 Utilização de rejeitos na fabricação de cerâmica

O reaproveitamento de resíduos de outros setores industriais na indústria cerâmica é uma estratégia sustentável que contribui para a redução do impacto ambiental e a otimização do uso de matérias-primas. Essa abordagem está alinhada com as diretrizes do Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (BRASIL, 2010), uma lei brasileira que estabelece diretrizes para a destinação adequada de resíduos sólidos, promovendo práticas ambientais responsáveis por meio de conceitos, propostas e orientações (GUIMARÃES, 2015).

Segundo Souza (2007), a inclusão de resíduos nos processos cerâmicos apresenta pelo menos três benefícios principais: a reciclagem e a inertização de materiais potencialmente poluentes e de difícil remoção, a economia de matérias-primas e, conseqüentemente, a extensão da durabilidade das jazidas e a diminuição dos gastos. Ademais, esta opção pode aprimorar as características dos produtos cerâmicos semi-acabados e finalizados, mesmo

que, em algumas situações, possa prejudicar o rendimento em determinados aspectos. Esses efeitos estão presentes em todas as fases da produção, incluindo a moldagem, secagem e sinterização, afetando propriedades dos produtos acabados, como retração, porosidade, absorção e resistência mecânica.

Guimarães (2015), estudou a incorporação de alguns resíduos, incluindo o rejeito de rochas ornamentais em massas cerâmicas brancas, visando melhorar o processo de conformação. Os resultados foram promissores, indicando que misturas com mais de 30% desses resíduos apresentaram um excelente desempenho. Além disso, o material demonstrou ótima qualidade estética, tornando-se uma alternativa viável para a fabricação de revestimentos e utensílios cerâmicos.

Nesse contexto, o aproveitamento dos rejeitos gerados no processamento do espodumênio, uma das principais fontes de lítio, é crucial tanto para minimizar os impactos ambientais quanto para maximizar a recuperação de recursos. O espodumênio, utilizado amplamente na produção de baterias de íon-lítio, gera grandes volumes de resíduos durante a mineração e o beneficiamento. Esses resíduos, chamados de rejeitos, contêm minerais como quartzo além de outros pertencentes aos grupos das micas e feldspatos, que podem ser recuperados para usos industriais, como na fabricação de vidro e cerâmicas (NANDIHALLI *et al*, 2024).

Rezende (2024), propôs a incorporação de rejeito de espodumênio, um mineral rico em lítio, na produção de cerâmica branca, utilizando argila como matéria-prima. A pesquisa envolveu a caracterização mineralógica do rejeito e a confecção de corpos de prova variando as proporções de rejeito na mistura (0%, 5%, 10%, 20% e 30%). Os testes realizados demonstraram resultados positivos, evidenciando que a adição do rejeito de espodumênio como fundente contribuiu para propriedades favoráveis na cerâmica, como resistência à compressão e redução na absorção de água, alinhando-se assim aos princípios de sustentabilidade na indústria cerâmica.

Além disso, existem iniciativas focadas em minimizar a necessidade de armazenamento de rejeitos em barragens, uma prática que pode trazer sérios

riscos ambientais, como a contaminação de lençóis freáticos. A reutilização desses rejeitos na construção civil, especialmente como matéria-prima para cimento e concreto, tem se mostrado promissora, contribuindo para a diminuição do impacto ambiental e transformando resíduos em recursos valiosos que, de outra forma, seriam descartados (FOSU, 2022).

### **3.3 Cadeia produtiva do lítio**

No Brasil, as principais fontes de lítio estão associadas aos pegmatitos litiníferos, localizados predominantemente no norte de Minas Gerais e no Nordeste do país. Esses pegmatitos são rochas ígneas de granulação grossa, formadas pela cristalização de líquidos pós-magmáticos, que resultam em corpos tabulares de grandes dimensões. Eles são compostos principalmente por feldspato, quartzo e mica, com o espodumênio e outros minerais de lítio ocorrendo como componentes acessórios (BRAGA e SAMPAIO, 2008).

De acordo com Freire (2020), várias teorias buscam explicar a origem dos pegmatitos, mas devido à complexidade dessas rochas, os processos envolvidos ainda não são totalmente compreendidos. A teoria mais aceita sugere que os pegmatitos se formam a partir da cristalização de magmas graníticos, onde os elementos incompatíveis não se incorporam aos primeiros minerais, permanecendo no magma residual. Esse magma, ao se enriquecer com elementos raros e voláteis, diminui a temperatura de cristalização e retarda a nucleação, permitindo o crescimento de cristais grandes e bem formados, típicos dos pegmatitos (SIMMONS e WEBBER, 2008).

Os pegmatitos podem ser classificados em duas categorias: os não zonados (homogêneos), que têm uma mistura uniforme de quartzo, feldspatos potássicos e mica, com cristais de tamanhos de centímetros a decímetros, e os zonados (heterogêneos), que apresentam zonas distintas de composição mineral e granulometria, podendo incluir corpos de substituição (JAHNS, 1955; apud VIDAL e NOGUEIRA NETO, 2005).

O espodumênio ( $\alpha$ -LiAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) e a petalita (LiAlSi<sub>4</sub>O<sub>10</sub>) são os minerais de lítio mais relevantes encontrados nos pegmatitos graníticos primários, não só no Brasil, mas também em outros depósitos na África e nos Estados Unidos (DIAS, 2015). Embora a petalita tenha um teor de lítio inferior (entre 3% e 4,5% de Li<sub>2</sub>O)

quando comparada ao espodumênio (que apresenta de 1,5% a 7% de  $\text{Li}_2\text{O}$ ), ainda é considerada uma fonte viável para extração de lítio em diversos depósitos ao redor do mundo (GEOLOGY SCIENCE, s.d.).

A produção de lítio a partir de salmouras, embora simples e de baixo custo, ocorre em locais geograficamente limitados. Diante disso, a exploração de pegmatitos tem ganhado relevância como alternativa, apesar do processo de concentração ser mais complexo. Esses depósitos, no entanto, apresentam ampla distribuição geográfica, o que favorece seu aproveitamento (VIANA, 2006). Segundo o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2024), em 2023, a produção global de lítio superou 180 mil toneladas, representando um aumento de 23% em relação ao ano anterior, o que evidencia a crescente busca por novas fontes desse recurso.

A produção industrial de compostos de lítio no Brasil é baseada principalmente no mineral espodumênio. Após a etapa de cominuição para liberar o mineral, a concentração é realizada por processos gravíticos, como separação em meio denso, técnicas magnéticas ou flotação, que aumentam a pureza do lítio extraído (BRAGA e FRANÇA, 2011). A concentração do lítio a partir do espodumênio pode ser feita por três métodos principais: separação em meio denso, flotação e decrepitação.

A flotação do espodumênio no Brasil não era comumente utilizada devido às dificuldades de separação seletiva desse mineral de outros silicatos, como quartzo, microclina e muscovita, presentes nos depósitos pegmatíticos. Contudo, estudos como os de Viana (2006) demonstraram que a separação seletiva pode ser realizada com flotação reversa em pH 5,0 utilizando acetato de aminas primárias, ou flotação direta com sulfonatos em pH 1,85.

No processo de separação em meio denso, um fluido de densidade intermediária é utilizado para separar o espodumênio dos minerais associados, como quartzo e feldspato, que possuem densidades diferentes (CETEM, 2018). O espodumênio, sendo mais denso, afunda, enquanto os minerais de menor densidade, como quartzo e feldspato, flutuam, tornando o processo eficaz para essa separação.

A flotação, que é um método baseado nas propriedades hidrofóbicas dos minerais, pode ser realizada de forma direta ou reversa, dependendo das características do minério e dos reagentes usados. Esse método é eficiente para separar o espodumênio de minerais como microclina e muscovita (VIANA, 2006).

A decrepitação é um processo térmico aplicado ao concentrado de lítio em fornos rotativos a temperaturas entre 1.000 e 1.100°C. Esse tratamento converte o  $\alpha$ -espodumênio em  $\beta$ -espodumênio, uma forma mais reativa do mineral, permitindo que o concentrado calcinado seja posteriormente tratado com ácidos ou álcalis, gerando compostos como carbonato ou hidróxido de lítio (BRAGA e SAMPAIO, 2008).

O hidróxido de lítio monohidratado é amplamente utilizado em graxas lubrificantes, devido à sua capacidade de manter a viscosidade em diversas temperaturas. O carbonato de lítio, outro produto importante, é utilizado na indústria de vidro, cerâmica e alumínio primário (BRAGA e SAMPAIO, 2008).

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Caracterização do Rejeito de Lítio**

#### **4.1.1 Análise Granulométrica**

Nesta etapa, foi feito um peneiramento a úmido no Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN/UFOP, usando peneiras da série Tyler, variando de 300 e 38  $\mu\text{m}$ . A fração granulométrica inferior a 38  $\mu\text{m}$ , foi analisada por meio do granulômetro a laser CILAS 1064 no laboratório de Propiedades Interfaciais do DEMIN/UFOP.

#### **4.1.2 Análise Mineralógica**

Para determinar a composição mineralógica da amostra, foi utilizada a técnica de difração de raios X. O experimento foi conduzido no Laboratório de Microscopia Ótica e Difractometria de Raio X do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN/UFOP), empregando o difratômetro PANalytical X'Pert<sup>3</sup> Powder e foi aplicado o método do pó total.

#### **4.1.3 Determinação Peso específico**

A quantificação do peso específico foi realizada com um picnômetro a gás Ultrapyc 1200e da Quantachrome Instruments no laboratório de propriedades interfaciais do DEMIN/UFOP, utilizando hélio como gás inerte. Parâmetros ajustados: temperatura de 25,1°C, pressão de 17,0 psig e tempo de purga de 4 minutos. O processo foi realizado em triplicata e a média dos valores obtidos foi calculada.

#### **4.1.4 Análise Termogravimétrica**

A análise quanto à decomposição termogravimétrica foi realizada utilizando o equipamento TA Q50 da TA Instruments em um intervalo de 0°C até 1000°C. O experimento, conduzido no Laboratório de Espectroscopia no Infravermelho e Análise Termogravimétrica do DEMIN/UFOP, tem como objetivo analisar a estabilidade térmica e as mudanças de massa dos materiais em função da temperatura.

#### 4.1.5 Área Superficial (BET)

A área superficial das partículas foi quantificada via utilizando o equipamento Nova 1200e (Quatacrome) no laboratório de Propriedades Interfaciais DEMIN/UFOP. Durante o experimento, a amostra foi mantida a uma temperatura de 195 °C e exposta a uma série de pressões relativas, usando nitrogênio como gás adsorvente.

#### 4.1.6 Análise Química

Para quantificação dos elementos químicos, foram utilizadas as técnicas de fluorescência de raios X (para os elementos majoritários) e de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (para os elementos minoritários). Para a fluorescência foi utilizado o equipamento da Bruker, modelo S2 Puma (Laboratório de Microscopia Ótica, Difração de Raio X e Fluorescência de Raio X – DEMIN/UFOP) e para a emissão óptica foi utilizado ICP/OES, marca Varian, modelo 725-ES (Laboratório de BioHidrometalurgia – DEMET/UFOP).

### 4.2 Caracterização da Argila

A caracterização prévia da argila usada na amostra, originária de São João del Rei-MG, foi realizada no estudo de Santos (2023). A TABELA 3 apresenta os dados coletados.

Tabela 3 - Caracterização da matéria prima (Argila).

Argila	
<b>d80</b>	5000µm
<b>Densidade</b>	2,66 g/cm <sup>3</sup>
<b>Área superficial específica</b>	13,1025 m <sup>2</sup> /g
<b>Análise química</b>	Al = 12,95% SiO <sub>2</sub> = 2,81% Li = 0,0047% Mn = 0,21% Fe = 0,23%

FONTE: Adaptado de SANTOS (2023).

Para adequar a argila ao uso na produção de cerâmica branca, foi realizada uma etapa de peneiramento em 212 µm. Essa escolha se deve à

necessidade de otimizar a conformação do corpo cerâmico, uma vez que a argila apresenta uma granulometria grossa.

#### **4.2.1 Análise Mineralógica**

Para determinar a composição mineralógica da amostra, foi utilizada a técnica de difração de raios X (DRX). O experimento foi conduzido no Laboratório de Microscopia Ótica e Difractometria de Raios X do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN/UFOP), empregando o difratômetro PANalytical X'Pert<sup>3</sup> Powder e o método do pó total.

### **4.3 Ensaios De Corpos Cerâmicos**

#### **4.3.1 Confeção dos Corpos de Prova**

Nessa etapa, foi avaliada a porcentagem de incorporação do rejeito de minério de lítio nas composições cerâmicas, com as seguintes proporções: 0%, 5%, 10%, 20%, e 30% do rejeito proveniente da concentração de um minério de lítio. Para cada uma dessas cinco condições, foram confeccionados seis corpos de prova, permitindo a realização de testes em triplicata.

##### **4.3.1.1 Ajuste da Umidade da Amostra**

Nesta fase, a umidade de cada amostra foi ajustada no Laboratório de Materiais Cerâmicos (DEMIN/UFOP) para ficar entre 5% e 15%, conforme recomendado por Paschoal (2003) para evitar trincas e fraturas em corpos cerâmicos prensados.

##### **4.3.1.1 Conformação e Tratamento Térmico dos Corpos Cerâmicos**

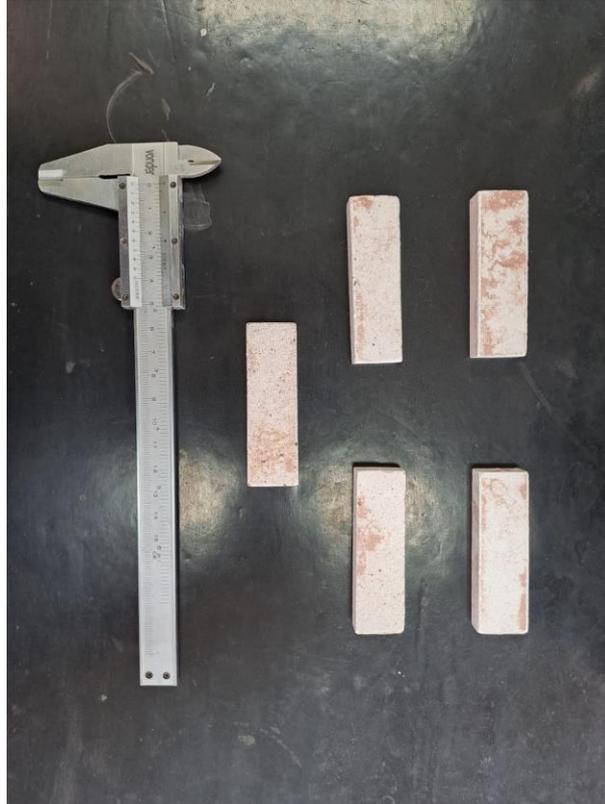
A conformação dos corpos cerâmicos foi realizada no Laboratório de Reologia e Petróleo (DEMIN/UFOP) usando uma prensa hidráulica SoloCap CL100 com pressão de 28 MPa, conforme Silva (2020). Após a compressão, as amostras formaram prismas quadrangulares de 70 x 10 x 20 mm.

O processo de secagem foi realizado no Laboratório de Tratamento de Minérios (DEMIN/UFOP) em uma estufa da marca Biopar, a 110°C por 24 horas, conforme BRITO *et al.* (2015).

A sinterização dos corpos cerâmicos foi realizada no Laboratório de Reologia e Petróleo (DEMIN/UFOP) a 1100°C, com um patamar de 2 horas e

uma taxa de aquecimento de 5°C/min, conforme Albuquerque et al. (2007). O equipamento utilizado foi o forno Linn Elektro Therm CC405.

Figura 4 - Corpo de Prova Após Sinterização



Fonte: Autor

### 4.3.2 Ensaio tecnológicos para caracterização dos corpos cerâmicos

#### 4.3.2.1 Limites de Atterberg

Dantas (2008) esclarece que o limite de liquidez refere-se à quantidade de água contida em um material quando ele passa do estado líquido para o plástico. Por outro lado, o limite de plasticidade é atingido quando o material perde sua habilidade de se deformar de forma plástica. O índice de plasticidade, um indicador crucial para avaliar a qualidade e a viabilidade industrial das argilas, é definido pela diferença entre esses dois limites, conforme a EQUAÇÃO 1:

$$IP = LL - LP \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

#### 4.3.2.2 Resistência à Compressão Uniaxial (RCU)

A resistência a compressão uniaxial (RCU) foi definida ao utilizar a prensa hidráulica SoloCap CL100 toneladas-forças, onde o corpo de prova (CP) é posicionado no centro do equipamento. Após a ativação da prensa, ocorre um aumento progressivo da força normal aplicada sobre a amostra até que esta atinja o ponto de ruptura, momento em que a carga incidente é registrada. A resistência à compressão uniaxial é determinada pela relação entre a carga aplicada no instante da ruptura e a área da seção transversal do corpo de prova (CP), conforme representado na EQUAÇÃO 2.

$$RCU = \frac{F}{A} \times 10 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

RCU – resistência a compressão (MPa);

F – Carga no instante em que o CP se rompe (KN);

A – área da superfície do CP (cm<sup>2</sup>).

#### 4.3.2.3 Absorção de Água (AA)

O parâmetro de absorção de água (AA) é avaliado após a fase de queima do material. Durante o teste, os corpos de prova são mergulhados em um recipiente contendo água fervente por um intervalo de duas horas. Para prevenir a exposição direta da amostra à chama, são inseridas esferas de vidro resistente no fundo do recipiente. Depois de aquecidos, os corpos de prova permanecem em repouso por um período de 30 minutos. Depois, a água excedente é eliminada com papel toalha. A EQUAÇÃO 3 determina o valor final da absorção de água.

$$AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

AA – índice de absorção de água (%);

mu– massa do CP úmido (g);

ms – massa do CP seco (g).

#### 4.3.2.4 Perda ao Fogo

É caracterizada pela perda de massa dos corpos cerâmicos durante a fase de sinterização. É possível quantificá-la através da EQUAÇÃO 4. Os pesos dos objetos cerâmicos antes e depois do procedimento de queima.

$$PF = 100 \times \frac{(ms - mq)}{ms} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

PF: perda ao fogo (%);

ms: massa do CP após a secagem (g);

mq: massa do CP após a queima (g).

#### 4.3.2.5 Massa Específica Aparente (MEA)

Para determinar o MEA, utiliza-se a EQUAÇÃO 5, que relaciona a massa do corpo de prova (CP) seco após a queima com seu volume aparente.

$$MEA = \frac{ms}{Vap} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

MEA – massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>);

ms – massa do CP seco (g);

Vap – volume aparente do CP (cm<sup>3</sup>).

#### 4.3.2.6 Retração Linear de Secagem (RLS) E Retração Linear de Queima (RLQ)

O coeficiente de retração linear representa a mudança dimensional que um objeto cerâmico experimenta após as fases de secagem e queima. O seu valor é estabelecido pela relação entre o comprimento do corpo de prova (CP) antes e após a conclusão de cada fase do procedimento. Os cálculos da retração linear de secagem (RLS) e da retração linear de queima (RLQ) são apresentados nas EQUAÇÕES 6 e 7 respectivamente.

$$RSL = \frac{Li - Ls}{Ls} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

$$RLQ = \frac{Ls-Lq}{Lq} X 100$$

(Equação 7)

Onde:

RLS – retração linear de secagem;

RLQ – retração linear de queima;

Li – comprimento do CP antes da secagem (cm);

Ls – Comprimento do CP depois da secagem (cm)

Lq – Comprimento do Cp depois da queima (cm)

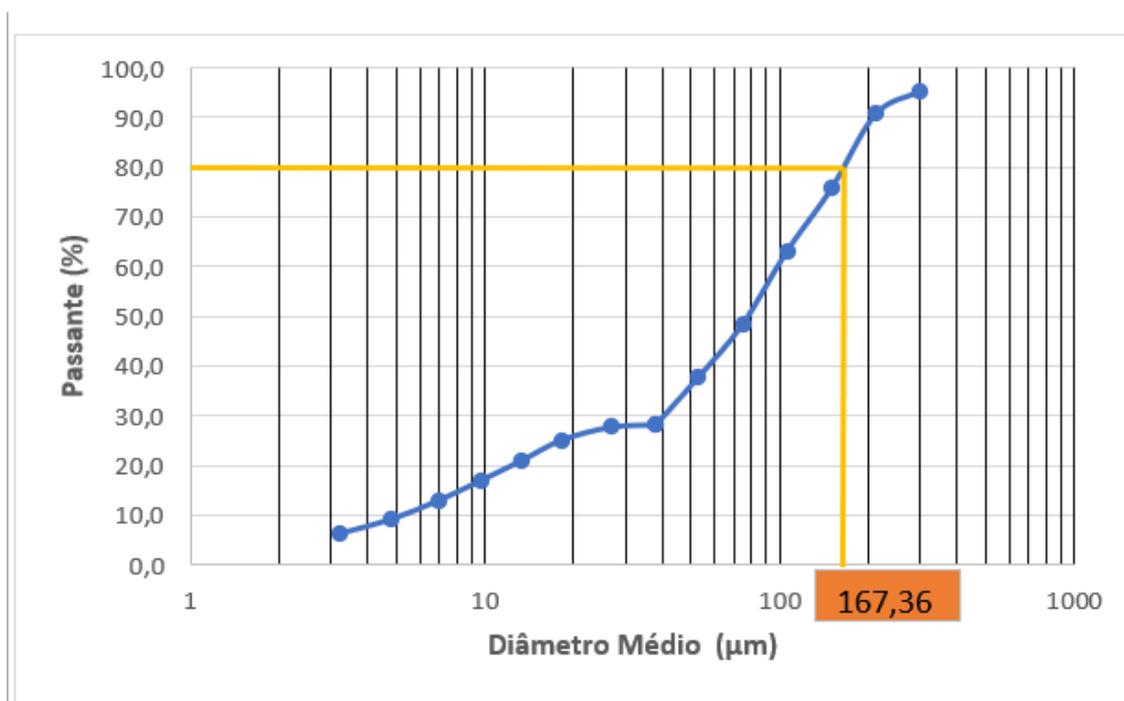
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização do Rejeito de Lítio

#### 5.1.1 Análise Granulométrica

Os dados obtidos pelo peneiramento a úmido juntamente com o granulômetro a laser, são apresentados no FIGURA 5. Percebe-se que o d80 da amostra tem uma média de 167,36 ( $\mu\text{m}$ ).

Figura 5 - Análise Granulométrica



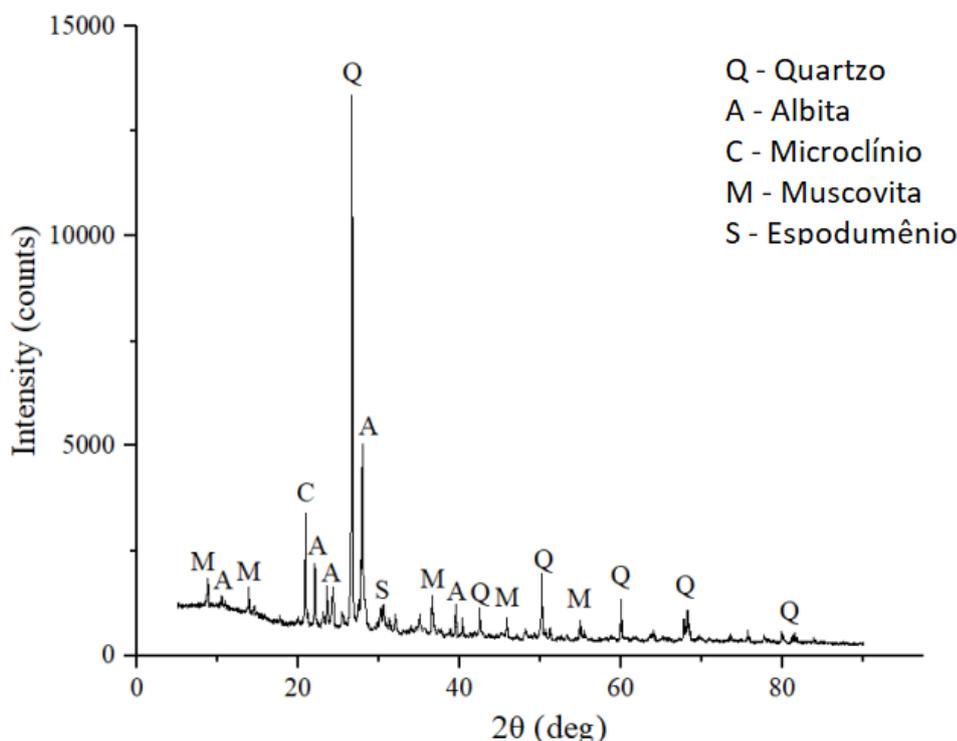
Segundo Lima e Valadão (2008), estudos indicam que a flotação pode ser aplicada com sucesso em faixas granulométricas entre 10 e 300  $\mu\text{m}$ . Isso é compatível com a amostra analisada neste trabalho, proveniente da fase de flotação, que apresenta granulometria variando de 38 a 300  $\mu\text{m}$ . De acordo com Pradicelli (1997), os insumos não plásticos utilizados na fabricação de cerâmica devem ter granulometria superior a 60  $\mu\text{m}$  e ser aplicados em quantidades moderadas.

#### 5.1.2 Análise Mineralógica

A FIGURA 6 mostra os resultados obtidos por meio da técnica de difratometria de raios X, juntamente com a semi-quantificação realizada no

software HighScore Plus. A composição mineralógica da amostra analisada é composta por de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), microclina ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ) e espodumênio ( $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$ ).

Figura 6 - Difratoograma de amostra de rejeito de minério de lítio



Segundo Andrade (2008), os feldspatos, como Albita e Microclina, são fundamentais na fabricação de cerâmica tradicional, atuando como fundentes que facilitam a fusão das matérias-primas a temperaturas mais baixas, essenciais para a sinterização. Eles também ajudam a controlar a retração durante a queima, evitando deformações e fissuras, e são cruciais para a formação de uma fase vítrea que confere resistência e durabilidade ao produto.

O quartzo atua como material refratário e controlador da expansão térmica na cerâmica. Isso confere resistência mecânica, evita deformações e controla a dilatação térmica, reduzindo o risco de trincas e deformações no resfriamento (BRAGANÇA; BERGMANN, 2004). A presença de espodumênio tem função, no corpo cerâmico, reduzir a temperatura de fusão dos componentes cerâmicos durante a sinterização, o que facilita o processo de fabricação e melhora a qualidade final do produto. (CAVALCANTE. *et al.*, 2000).

A muscovita recristaliza em fases mais estáveis, resultando em maior resistência mecânica para os materiais cerâmicos (FÖLDVÁRI, 2011).

### 5.1.3 Determinação do Peso Específico

Com base nos dados obtidos por meio do ensaio de picnometria a gás hélio (Tabela 4), foi possível determinar com precisão a densidade da amostra de rejeito, que resultou em 2,77 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 4 - Peso Específico Medido

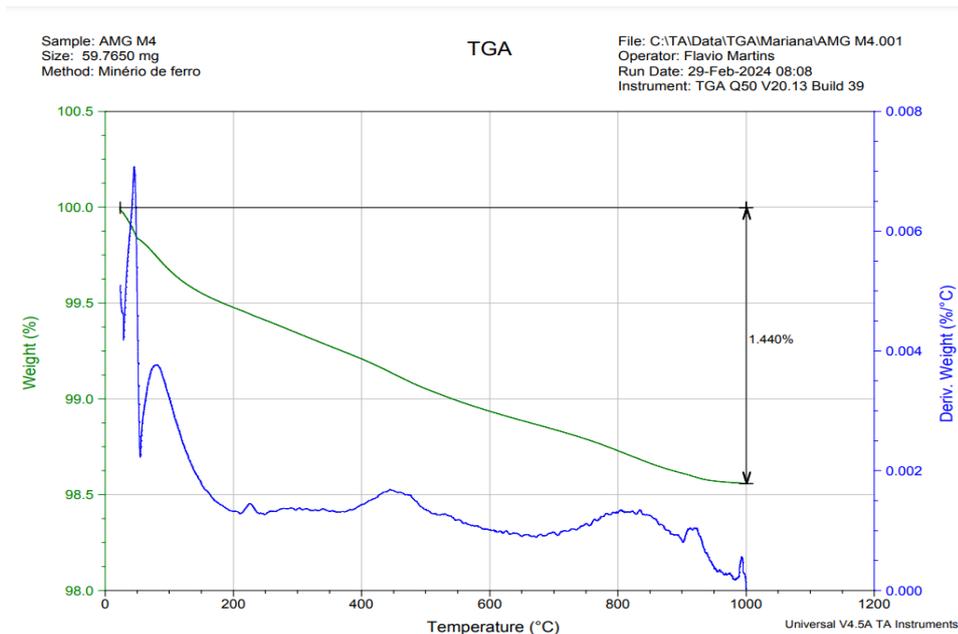
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	
Run 1	2,7683
Run 2	2,7720
Run 3	2,7713
Média	2,77053

A densidade medida para a amostra analisada apresentou valor próximo ao do quartzo (2,65 g/cm<sup>3</sup>) e compatível com as densidades de feldspatos como a albita (2,62 g/cm<sup>3</sup>) e a microclina (2,56 g/cm<sup>3</sup>). Também foi observada uma diferença em relação às densidades de minerais como o espodumênio (3,18 g/cm<sup>3</sup>) e a muscovita (2,8 g/cm<sup>3</sup>), que apresentam valores mais elevados.

### 5.1.4 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA) desempenha um papel fundamental na caracterização do rejeito de lítio, permitindo a identificação das fases voláteis presentes na amostra. A perda de massa total na análise, variando a temperatura entre 0°C e 1000°C, foi de 1,440%, como mostra a FIGURA 7.

Figura 7 - Termograma da amostra



De acordo com Földvari (2011), os picos observados entre 100°C e 200°C são característicos da presença de água livre e da perda de umidade na amostra. Segundo Lenger (2006), também encontra-se nessa faixa o pico de desidratação da albita. O pico de menor intensidade entre 150°C e 200°C pode estar associado à perda de água coordenada aos cátions (Gonçalves et al., 2014). Possivelmente, entre 500°C e 700°C ocorre a transição estrutural quartzo- $\alpha$  para quartzo- $\beta$ , que, conforme Földvari (2011). No entanto, variações de mais de 50°C em relação a essa temperatura são frequentemente observadas, sendo atribuídas à gênese ou origem, forma e temperatura de formação dos cristais (Lřnvik e Smykatz-Kloss, 1984). Já a desidroxilação da muscovita ocorre de forma simples na faixa de temperatura entre 820°C e 920°C (Földvari et al., 2011). O pico do espodumênio não foi observado, pois sua desidroxilação ocorre a 1200°C, enquanto o ensaio, conforme mencionado no capítulo anterior, foi realizado até o limite de 1000°C. De acordo com Pereira (2018), os feldspatos não passam por um processo de desidroxilação devido à sua estabilidade mássica e à ausência de elementos voláteis em sua composição química.

### 5.1.5 Área Superficial (BET)

Os resultados da análise de área superficial específica pelo método BET indicaram que a amostra possui uma área superficial de 2,250 m<sup>2</sup>/g,

caracterizando-a como um material com baixa porosidade. Menores níveis de porosidade geralmente resultam em maior densidade e resistência mecânica, além de menor absorção de água, o que contribui para a durabilidade e resistência a intempéries. Esse resultado está em comum com os parâmetros para cerâmicas não plásticas (1,0 - 2,5 m<sup>2</sup>/g) (MENEZES *et al.*, 2005).

### 5.1.6 Análise Química

Os resultados obtidos para a composição química do material indicaram a presença predominante dos seguintes elementos: Silício (Si), Alumínio (Al), Sódio (Na), Potássio (K) e Cálcio (Ca). Os elementos lítio (Li), rubídio (Rb), tântalo (Ta), estrôncio (Sr) e nióbio (Nb) também foram identificados como elementos traço. As concentrações dos elementos em termos de óxidos foram:

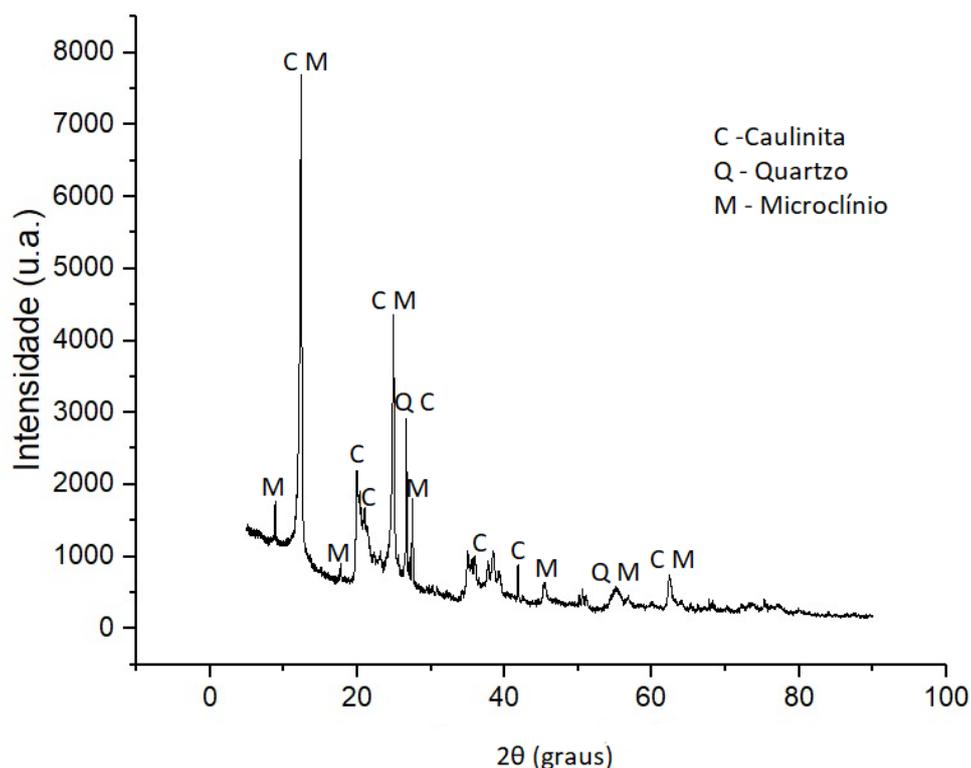
Tabela 5 - Análise Química

Elemento (em função dos óxidos)	Teor (%)
SiO <sub>2</sub>	71,87%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,15%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,95%
Na <sub>2</sub> O	3,74%
K <sub>2</sub> O	1,91%
CaO	0,99%
Rb <sub>2</sub> O	0,75%
Li <sub>2</sub> O	0,69%
MgO	0,66%
F	0,17%
MnO	0,16%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10%

## 5.2 Análise mineralógica da argila

A FIGURA 8 mostra os resultados obtidos por meio da técnica de difratometria de raios X, juntamente com a semi-quantificação realizada no software HighScore Plus. A amostra é majoritariamente constituída por caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e microclínio ( $\text{KAISi}_3\text{O}_8$ ).

Figura 8 - Difratograma de raio X da argila em estudo



Devido à sua coloração clara e ao alto teor de caulinita presente na amostra, pode-se concluir, do ponto de vista mineralógico, que o material se caracteriza-se como um caulim. O material apresenta uma composição favorável para aplicação na indústria de cerâmica branca, devido ao seu teor de caulinita, que varia entre 75% e 85% (SOUZA, 2007).

## 5.3 Ensaios para caracterização dos corpos cerâmicos

Nos tópicos que seguem serão apresentados os resultados obtidos a partir da determinação dos parâmetros de qualidade dos corpos cerâmicos obtidos.

### 5.3.1 Limites De Atterberg

Os resultados deste ensaio foram obtidos a partir das análises dos limites de liquidez e plasticidade. Para a comparação, foram avaliadas duas amostras: uma composta exclusivamente por argila e outra contendo uma mistura com 30% de rejeito. Os dados estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Limites de Atterberg.

Amostras	0 (%) Argila Pura	30 (%) Argila + Rejeito
Limites de Liquidez (%)	30,15	26,69
Limites de Plasticidade (%)	26,8	23,17
Índice de Plasticidade (%)	7,36	3,53

Caputo (1988) classifica os solos com base no índice de plasticidade (IP) da seguinte forma: materiais com IP entre 1% e 7% são considerados fracamente plásticos, aqueles com valores entre 7% e 15% são medianamente plásticos, enquanto índices superiores a 15% caracterizam solos altamente plásticos. Além disso, segundo Motta et al. (1993), as argilas brasileiras utilizadas como referência para aplicação industrial na produção de cerâmica branca apresentam um limite de plasticidade variando entre 31,4% e 32,9%.

As amostras analisadas neste trabalho apresentaram índices abaixo dos valores aceitáveis, para a utilização da argila na indústria de cerâmica branca, seria necessária a adição de outra argila com maior índice de plasticidade, a fim de ajustar o material a um valor compatível. Morais e Sposto (2006) afirmam que, para as massas cerâmicas destinadas à conformação, o ideal é que sejam compostas por duas argilas: uma com alta plasticidade e outra com baixa plasticidade.

### 5.3.2 Resistência à Compressão Uniaxial (RCU)

O parâmetro de resistência à compressão uniaxial não apresentou resultados satisfatórios. Esperava-se que o corpo de prova se rompesse durante o ensaio, o que não ocorreu. Em vez disso, com o aumento da força aplicada, a amostra sofreu deformação progressiva, assemelhando-se a um processo de esmagamento, conforme ilustrado na FIGURA 9.

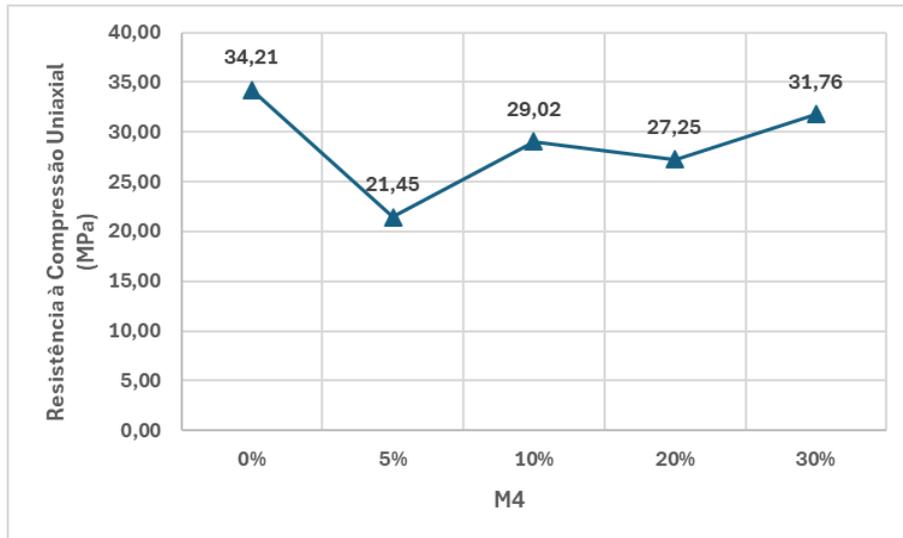
Figura 9 - Corpo de Prova Após Prensagem



Fonte: Autor

O aumento do teor de rejeito era esperado para resultar em uma maior resistência à compressão das amostras cerâmicas. No entanto, os resultados não seguiram essa tendência, possivelmente devido à redução do índice de plasticidade (IP) associada à maior incorporação de rejeito. A diminuição do IP pode ter comprometido a coesão e a integridade estrutural das amostras, levando a uma resistência à compressão inferior ao esperado e a uma maior deformação das peças.

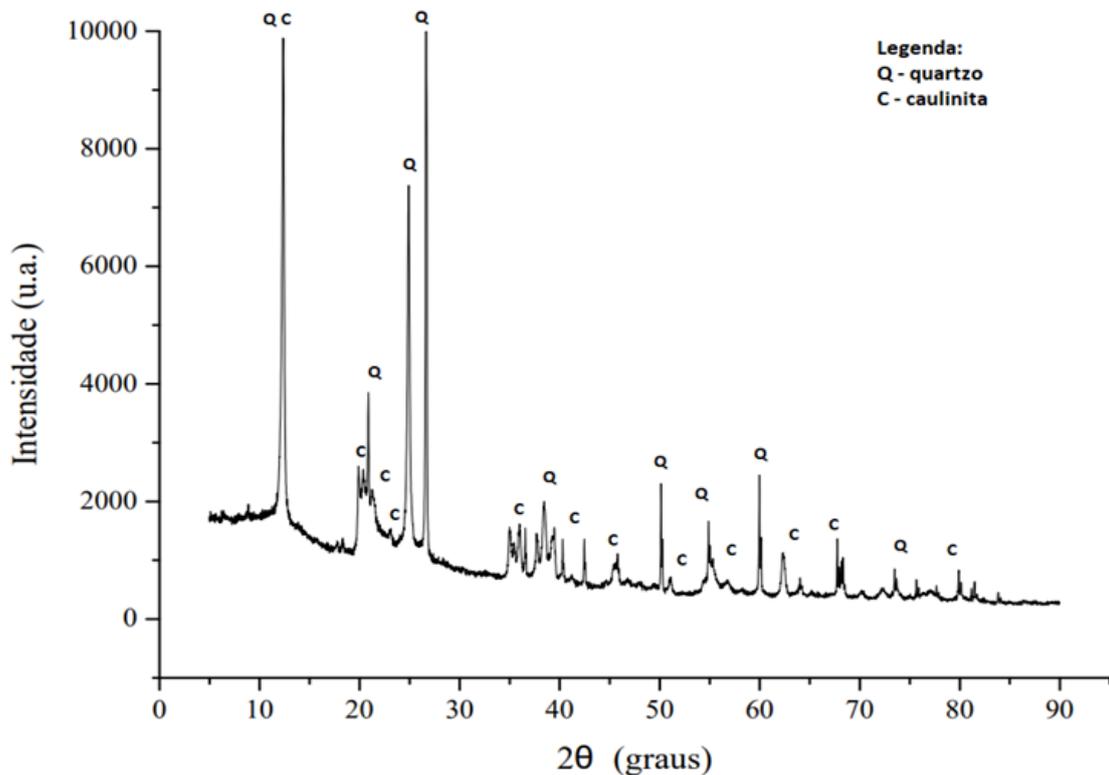
Figura 10 - Resistência à Compressão Uniaxial



Outra possível justificativa está relacionada à granulometria da argila. Segundo Souza (2007), para a fabricação de cerâmica branca, entre 20% e 30% das partículas devem ter tamanho inferior a 2  $\mu\text{m}$ , requisito não atendido pelo material analisado. No presente estudo, apenas 12% da amostra apresentou partículas nessa faixa, o que pode ter afetado a qualidade dos corpos cerâmicos.

Vale ressaltar que, no estudo de Rezende (2024), que utilizou o mesmo rejeito, porém com uma argila diferente, os testes de compressão tiveram êxito, mesmo com uma granulometria semelhante à do presente trabalho, contendo apenas 10% de partículas abaixo de 2  $\mu\text{m}$ . Diante disso, foi decidido comparar os difratogramas da argila utilizada neste estudo com aqueles da amostra caracterizada por Rezende (2024), previamente analisada por Martins (2021), a fim de identificar possíveis diferenças mineralógicas que possam justificar o comportamento divergente observado nos ensaios. O difratograma apresentado por Martins *et al* (2021) está disponível na FIGURA 11.

Figura 11 - Análise Mineralógica



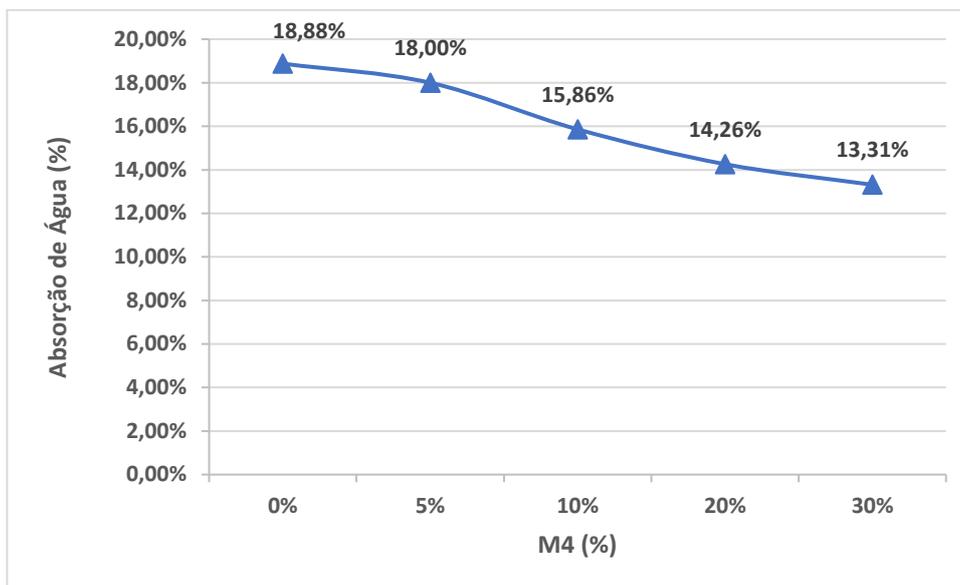
Fonte: Martins *et al* (2021)

Ao comparar as duas análises mineralógicas, percebe-se que a Figura 10 apresenta uma concentração mais elevada de picos de quartzo em relação à Figura 7. Como discutido anteriormente, o quartzo desempenha um papel fundamental na estruturação do material cerâmico, aumentando sua resistência mecânica e reduzindo deformações. Diante disso, levanta-se a hipótese de que a menor presença de quartzo na amostra deste estudo pode ter influenciado negativamente os resultados de resistência à compressão uniaxial, comprometendo o desempenho mecânico dos corpos cerâmicos.

### 5.3.3 Absorção de Água (AA)

A FIGURA 12 ilustra a variação no índice de absorção de água conforme a quantidade de rejeito na composição dos corpos de prova. Observou-se que o acréscimo de rejeito de minério de lítio nas amostras resultou em uma diminuição na capacidade de absorção de água do material.

Figura 12 - Absorção de Água



Esse resultado era esperado devido à presença de feldspatos como albita e microclínio no rejeito. Os feldspatos funcionam como fundentes, promovendo a formação das primeiras fases líquidas durante a queima. Assim, eles desempenham um papel essencial na densificação do material, contribuindo de maneira significativa para a diminuição da porosidade (RODRIGUEZ *et al.*, 2004).

Segundo a Tabela 1, todas as amostras são classificadas como faiança, no quesito absorção de água.

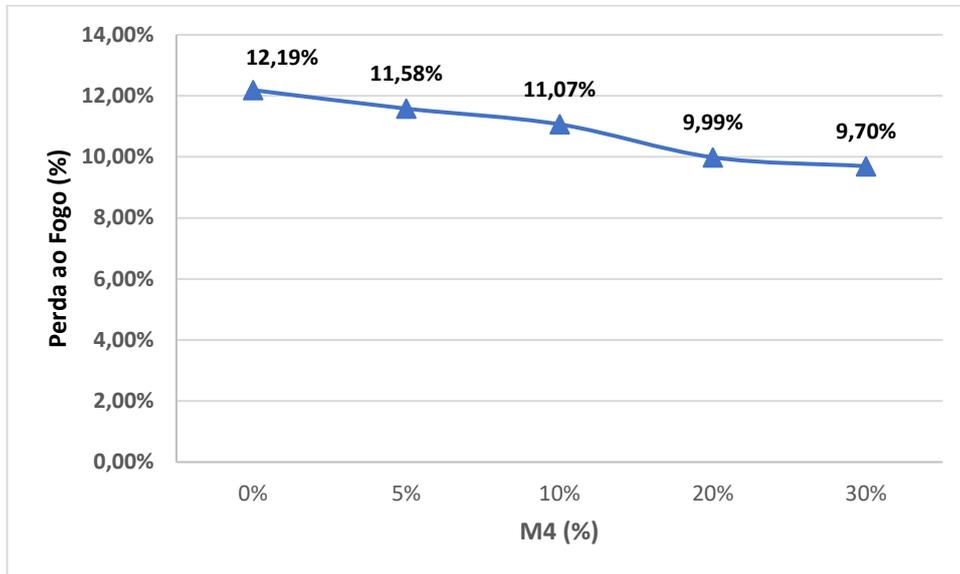
#### 5.3.4 Perda ao Fogo (PF)

A FIGURA 13 apresenta os valores de Perda ao Fogo (PF) das amostras em função da quantidade de rejeito presente na composição. Observou-se que a PF dos corpos cerâmicos diminui conforme a proporção de rejeito aumenta. Esse comportamento ocorre porque o rejeito substitui a argila, que possui maior conteúdo de matéria orgânica. Assim, com o aumento do rejeito, a quantidade de matéria orgânica na composição diminui, resultando em uma redução na Perda ao Fogo.

A análise da perda ao fogo é essencial para garantir a uniformidade do material produzido, pois perdas excessivas de massa podem comprometer as

dimensões do produto. Isso pode impactar negativamente sua qualidade, fazendo com que o item não atenda às especificações exigidas (GURGEL *et al*, 2020).

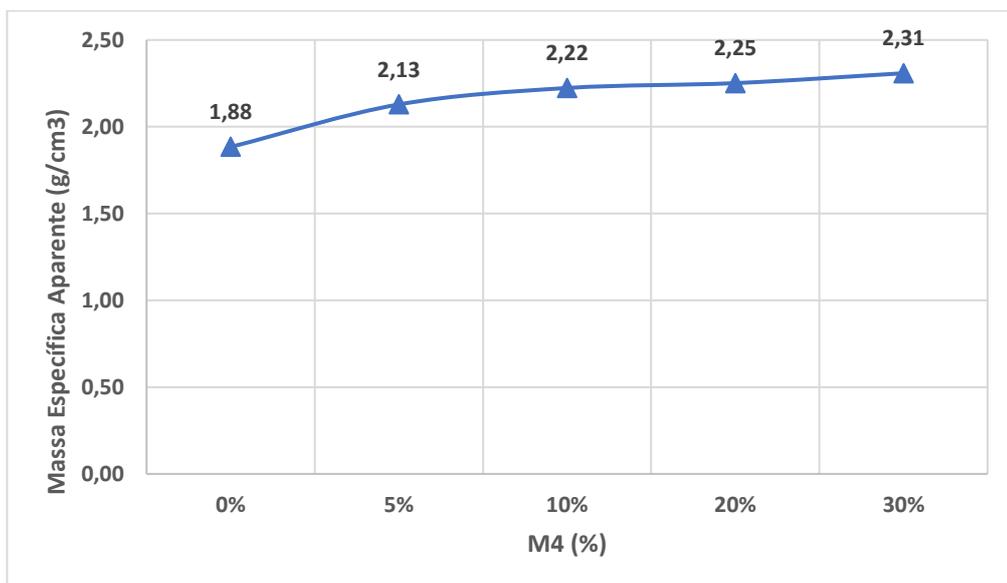
Figura 13 - Perda ao Fogo



### 5.3.5 Massa Específica Aparente

A massa específica aparente é um parâmetro fundamental na caracterização de corpos cerâmicos, pois está diretamente relacionada à porosidade, à densificação e às propriedades mecânicas do material. A FIGURA 14 apresenta os resultados obtidos.

Figura 14 - Massa Específica Aparente



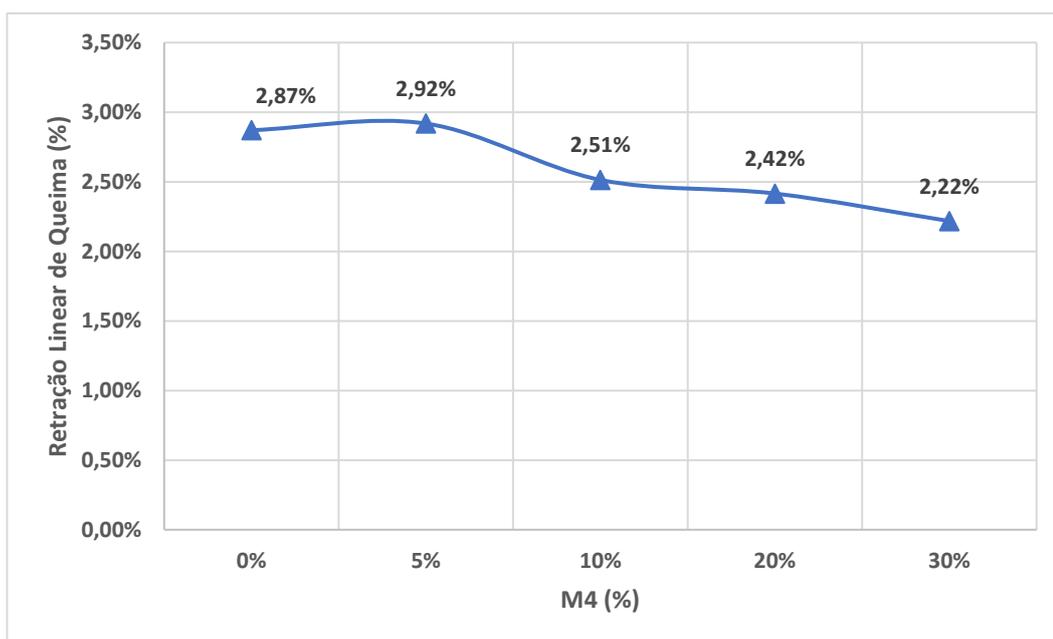
Os dados analisados indicam que o aumento da concentração de rejeito nas amostras resultou em um acréscimo na massa específica aparente. Esse comportamento sugere que a adição do rejeito de minério de lítio favoreceu a densificação dos corpos cerâmicos, possivelmente devido à sua influência na redução da porosidade e no rearranjo das partículas durante a sinterização.

A presença de feldspatos, como albita e microclínio no rejeito, justifica esse resultado. Como discutido anteriormente, esses minerais atuam como fundentes durante o processo de queima. Sua capacidade de gerar as primeiras fases líquidas favorece a densificação do material, promovendo um melhor empacotamento das partículas e reduzindo a porosidade da estrutura cerâmica (RODRIGUEZ *et al.*, 2004).

### 5.3.6 Retração Linear De Secagem (RLS) e de Queima (RLQ)

A retração linear de secagem foi inferior a 1%, indicando um efeito insignificante sobre os corpos cerâmicos, independentemente da variação na porcentagem de rejeito incorporada. Além disso, a Retração Linear de Queima apresentou uma variação muito pequena também, como observado na FIGURA 15.

Figura 15 - Retração de Queima



Nota-se uma pequena variação (de 2,92% até 2,22%), à medida que o teor de rejeito aumenta. No entanto, não ficou claro se a quantidade de feldspato no corpo de prova (CP) influencia o aumento ou a redução da RLQ.

## 6 CONCLUSÃO

Este estudo investigou o potencial de aproveitamento do rejeito da concentração de pegmatito litinífero na fabricação de cerâmica branca, buscando alternativas sustentáveis para reduzir o impacto ambiental da mineração e otimizar o uso de recursos naturais. A crescente demanda por lítio, impulsionada pelo avanço tecnológico e pela transição energética, torna fundamental o estudo de novas aplicações para os rejeitos desse processo, contribuindo para a economia circular e a minimização de desperdícios.

A caracterização do rejeito revelou uma composição mineralógica rica em quartzo, albita, microclina, muscovita e espodumênio. A análise granulométrica indicou um d80 de 167,36  $\mu\text{m}$ , demonstrando que o material possui distribuição de tamanho adequada para processos cerâmicos. A análise química confirmou a presença predominante de silício, alumínio, sódio, potássio e cálcio, com lítio presente em baixa concentração (0,69% de  $\text{Li}_2\text{O}$ ). A argila utilizada, é majoritariamente constituída por caulinita, sendo adequada para a produção de cerâmica branca.

Corpos cerâmicos foram confeccionados com diferentes proporções de rejeito de lítio (0%, 5%, 10%, 20% e 30%) e avaliados quanto aos limites de Atterberg, resistência à compressão uniaxial, absorção de água, perda ao fogo, massa específica aparente e retração linear.

A adição de rejeito de lítio resultou em diminuição da absorção de água apresentando valores entre 13,31% e 18,88. Essa redução está relacionada à presença de feldspato no M4, que atua como fundente na cerâmica. Devido ao seu baixo ponto de fusão, ele promove a formação de fases líquidas iniciais, preenchendo os poros e aproximando as partículas. Isso resulta em menor porosidade e, conseqüentemente, em menor absorção de água.

A perda ao fogo variou de forma inversa à quantidade de rejeito de minério de lítio na amostra. A composição 0% registrou uma perda de massa de 12,19%, enquanto a com 30% apresentou 9,70%, representando os maiores e menores valores observados após a sinterização, respectivamente. Esse comportamento pode ser atribuído à substituição parcial da argila pelo rejeito, uma vez que a argila contém um teor mais elevado de matéria orgânica. Com o aumento da

proporção de M4, a quantidade de compostos orgânicos na mistura diminui, levando a uma menor degradação térmica e, conseqüentemente, a uma redução na perda ao fogo.

A adição de rejeito de minério de lítio, aumentou a massa específica aparente dos corpos cerâmicos de 1,88 g/cm<sup>3</sup> para 2,31 g/cm<sup>3</sup>. Esse aumento ocorre devido à presença de feldspato no M4, que age como fundente durante a sinterização. O feldspato facilita a formação de uma fase líquida, promovendo a reestruturação da matriz cerâmica, reduzindo a porosidade e aumentando a densificação do material, o que resulta em maior compactação e uma estrutura mais coesa.

Os resultados do teste de retração linear indicam que as peças cerâmicas mantiveram um tamanho estável durante todo o processo. Na secagem, a contração foi mínima, abaixo de 1%, evidenciando que a adição de rejeito não causou rachaduras ou deformações. Após a queima, a retração variou ligeiramente de 2,87% (sem rejeito) para 2,22% (com 30% de M4), conforme mostrado no gráfico da Figura 15. Essa variação discreta sugere que a queima resultou em uma densificação uniforme das peças, com a quantidade de rejeito não impactando significativamente o tamanho final.

Os resultados do índice de plasticidade (IP) das amostras foram 7,36% para a argila pura e 3,53% para a mistura com 30% de rejeito. Esses valores estão abaixo dos índices recomendados para a produção de cerâmica branca, que exigem um IP entre 31,4% e 32,9%. Comparando os cenários, a adição de 30% de rejeito resultou em uma amostra com IP mais baixo, o que indica a necessidade de incorporar uma argila de maior plasticidade para atender aos requisitos industriais.

Os resultados de resistência à compressão uniaxial foram insatisfatórios, apesar da expectativa de aumento com o maior teor de rejeito. A deformação observada em vez da ruptura pode ser explicada pela redução do índice de plasticidade com a adição de rejeito, comprometendo a coesão das amostras. Além disso, a baixa quantidade de partículas abaixo de 2 µm na argila pode ter afetado a qualidade dos corpos cerâmicos. A comparação dos difratogramas

revelou menor concentração de quartzo na amostra deste estudo, o que pode ter prejudicado a resistência mecânica.

Os resultados obtidos demonstraram que o rejeito de pegmatito litífero possui potencial para ser utilizado como matéria-prima alternativa na fabricação de cerâmica branca. A incorporação do rejeito proporcionou melhorias em algumas propriedades do material cerâmico, como a redução da absorção de água e o aumento da massa específica aparente, o que pode contribuir para a produção de cerâmicas mais densas e resistentes.

## 6 Referências Bibliográficas

ABCeram. Processo de fabricação. Disponível em: <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>. Acesso em: 26 fev. 2025.

Albuquerque, F. R., et al. (2007). Planejamento experimental aplicado à otimização de massas cerâmicas contendo matérias-primas naturais. *Cerâmica*, 53, 300-398.

ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para revestimento, Louças Sanitárias e Congêneres. Números do setor. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setorceramico/numeros-do-setor>. Acesso em: 17 fev. 2025.

BRITO, I. P.; MENEZES, R. R.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Avaliação de novos depósitos de argilas do Estado da Paraíba visando sua aplicação como matérias-primas cerâmicas. *Cerâmica*, São Paulo, v. 61, n. 360, p. 391–398, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/rtcKKS98r3vRVZkXHBfksn/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

Braga, P. F. A., & França, S. C. A. (2011). Tecnologias para produção de carbonato e hidróxido de lítio a partir de espodumênio e amblygonita. In: Martins, L. M. P., et al. (Eds.), *Valorização de Pegmatitos Litíferos* (pp. 55-61). CYTED, Lisboa, Portugal.

Braga, P. F. A., & Sampaio, J. A. (2008). Lítio. In: *Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações* (2ª ed., pp. 585-603). Rio de Janeiro: CETEM/MCTI.

BRAGANÇA, Saulo Roca; BERGMANN, Carlos Perez. *Aspectos teóricos e práticos sobre a resistência mecânica de porcelanas*. *Cerâmica*, São Paulo, v. 50, n. 314, p. 264–269, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/fzLn5HDcrSmjMnKCfWg35pg/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

Cabral Jr, M., Motta, J. F. M., Tanno, L. C., & Zanardo, A. (2002). As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. *Cerâmica Industrial*, 7(1), 33-40.

Ceramics of Brazil. Números do Setor. Ceramics of Brazil. Disponível em: [https://www.ceramicsofbrazil.com/setor-ceramico/numeros-do-setor?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.ceramicsofbrazil.com/setor-ceramico/numeros-do-setor?utm_source=chatgpt.com). Acesso em: 06 mar. 2025.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. (1999). Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Branca e de Revestimento – Série P+L. São Paulo: CETESB. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguasinteriores/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/ceramica.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2025.

Dias, C. H. (2015). Mineralogia, tipologia e causas de cor de espodumênios da Província Pegmatítica Oriental do Brasil e química mineral de Nb-tantalatos da mina da Cachoeira (Minas Gerais). (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais.

Dantas, A. de P. A. (2008). Utilização de resíduos de rochas ornamentais na produção de cerâmica branca. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais.

FOSU, A. Y. et al. Novel extraction route of lithium from  $\alpha$ -spodumene by dry chlorination. *RSC Advances*, v. 12, n. 33, p. 21468–21481, 2022.

Freire, D. M. do N. (2020). Caracterização cristaloquímica e cristalofísica sobre a gênese de turmalina e columbita-(Fe) de pegmatitos das regiões de Solonópole e Berilândia no Estado do Ceará. (Tese de doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Galán, E., & Aparicio, P. (2006). Materias primas para la industria cerámica. In: *Tecnología de los materiales cerámicos* (pp. 21-44). Madrid: Editorial Síntesis.

Geology Science. (n.d.). Minério de lítio. Recuperado de: <https://pt.geologyscience.com/minerais-de-min%C3%A9rio/min%C3%A9rio-de-l%C3%ADtio/>

Guimarães, K. de L. M. (2015). Análise da adição de resíduos de ossos bovinos e rochas ornamentais em massa cerâmica branca para a utilização em processos de conformação. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Maranhão, São Luís. Disponível em: <http://tedebc.ufma.br:8080/jspui/handle/tede/1686>. Acesso em: 26 fev. 2025.

GURGEL, Jayne Francielle Santana et al. Coprocessamento de rejeito do Garimpo Areinha (Diamantina/MG) para produção de cerâmica vermelha. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 25, 2020.

Jaskula, B. W. (2024). Lithium. In Mineral Commodity Summaries 2024 (pp. 110-111). U.S. Geological Survey. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-lithium.pdf>

Jordão, M. A. P. (1988). Curso Internacional de Treinamento em Grupo em Tecnologia Cerâmica. IPT/JICA.

Luz, A. B.; Lins, F. A. F.; Roberto, F. A. da C.; Sousa, J. F. de; & Mattos, I. C. (2008). Rochas e minerais industriais: usos e especificações. 2ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.

Martins, L. M. P., et al. (2011). Valorização de pegmatitos litiníferos. Lisboa, Portugal.

Martins, M. G. (2021). Caracterização de uma argila da região norte de Minas Gerais para aplicações industriais.

Motta, J. F. M., Cabral Jr, M., Tanno, L. C., & Zanardo, A. (2002). As matérias-primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. *Revista Cerâmica Industrial*, 6(2).

Motta, J. F. M., Zanardo, A., & Cabral Junior, M. (2001). As matérias-primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. *Revista Cerâmica Industrial*, 6(2).

NANDIHALLI, Nagaraj et al. Aspects of spodumene lithium extraction techniques. *Sustainability*, v. 16, n. 19, p. 8513–8513, 30 set. 2024.

NORTON, Frederick Harwood. *Introdução à tecnologia cerâmica*. Tradução de Jefferson Vieira de Souza. São Paulo: Edgard Blücher, 1973.

Oliveira, M. da S. de. (2021). Estudo sobre defeitos em revestimentos cerâmicos e suas possíveis causas contaminantes. (Trabalho de Conclusão de Curso). Centro Universitário UniSATC, Criciúma.

Paschoal, J. A. A. (2003). Estudos de parâmetros de qualidade para cerâmica estrutural vermelha.

Pukaszewicz, A. G. M., & Grossa, P. (2001). Tecnologia dos processos de fabricação IV materiais cerâmicos. Coordenação de Mecânica. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

REZENDE, Luis Gustavo de Souza. Aplicação de rejeito de minério de lítio como fundente na produção de cerâmica branca. 2024. 55 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2024. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/6719>. Acesso em: 16 abr. 2025.

Rodriguez, A. M., Pianaro, S. A., Berg, E. A. T., & Santos, A. H. dos. (2004). Propriedades de matérias-primas selecionadas para a produção de grês porcelanato. *Cerâmica Industrial*, 9(1), 33-38.

Silva, M. C. A. (2020). Incorporação de finos de quartzito na produção de cerâmica vermelha.

Souza, L. L. de. (2007). Aproveitamento de resíduo de caulim em cerâmica branca. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

Simmons, W. B., & Webber, K. L. (2008). Pegmatite genesis: state of the art. *European Journal of Mineralogy*, 20, 421-438.

Vieira, L. E., et al. (2002). Avaliação do comportamento térmico de uma placa cerâmica ao longo do processo de monoqueima em forno a rolos.

Viana, P. R. M. (2006). Flotação de espodumênio, microclina, muscovita e quartzo com coletores aniônicos, catiônicos, anfotéricos e mistura de coletores. (Tese de doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais.

Vidal, F. W. H., & Nogueira Neto, J. A. (2005). Minerais de pegmatitos. In: Vidal, F.W.H., Sales, F.A.C.B., Roberto, F.A. da C., Sousa, J.F. de, & Mattos, I.C. (Organizadores), *Rochas e Minerais Industriais do Estado do Ceará* (pp. 67-81). Fortaleza: CETEM.

Zimmer, A., & Gomes, R. (2019). *Faianças, grês e porcelanas: Ciência e tecnologia*. Porto Alegre: Editora da UFRGS. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/10183/249681/1/001148963.pdf>