

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

**BRUNA CASTRO LOPES RAMOS
GABRIELE MARIA FERREIRA**

**REDUÇÃO DE SÍLICA REATIVA DE BAUXITA POR MEIO DE REAÇÕES
MECANICOQUÍMICAS COM CARBONATO DE CÁLCIO**

POÇOS DE CALDAS / MG

2026

**BRUNA CASTRO LOPES RAMOS
GABRIELE MARIA FERREIRA**

**REDUÇÃO DE SÍLICA REATIVA DE BAUXITA POR MEIO DE REAÇÕES
MECANICOQUÍMICAS COM CARBONATO DE CÁLCIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química pela
Universidade Federal de Alfenas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Grazielle Santos Silva
Andrade.

Coorientadora: Ms^a. Paula Cintra Fernandes.

Colaboradora: Prof^a. Dr^a. Daniela Gomes
Horta.

**POÇOS DE CALDAS / MG
2026**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Ramos, Bruna Castro Lopes.

Redução de Sílica Reativa de Bauxita por meio de Reações
Macanincoquímicas com Carbonato de Cálcio / Bruna Castro Lopes Ramos,
Gabriele Maria Ferreira. - Poços de Caldas, MG, 2026.

38 f. : il. -

Orientador(a): Grazielle Santos Silva Andrade.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) -
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2026.

Bibliografia.

1. Bauxita. 2. Processo Bayer. 3. Moagem. 4. Caulinita. 5. Alumina. I.
Ferreira, Gabriele Maria. II. Andrade, Grazielle Santos Silva, orient. III. Título.

**BRUNA CASTRO LOPES RAMOS
GABRIELE MARIA FERREIRA**

**REDUÇÃO DE SÍLICA REATIVA DE BAUXITA POR MEIO DE REAÇÕES
MECANICOQUÍMICAS COM CARBONATO DE CÁLCIO**

A Presidente da banca examinadora abaixo
assina a aprovação do Trabalho de Conclusão
de Curso apresentado como parte dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química pela Universidade
Federal de Alfenas.

Aprovada em: 26 de junho de 2026

Prof.^a Dr.^a Grazielle Santos Silva Andrade
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof.^a Dr.^a Giselle Patrícia Sancinetti
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof.^a Dr.^a Carolina Del Roveri
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

RESUMO

A presença da sílica reativa na bauxita metalúrgica representa um desafio significativo no processo Bayer, elevando o consumo de reagentes e os custos operacionais na produção de alumina. A moagem, uma das etapas de processamento mineral, conjunta com aditivos, fundamentada nos princípios das reações mecanoquímicas, desponta como uma alternativa promissora para inativar essa sílica reativa por meio da aplicação de energia mecânica. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da adição de carbonato de cálcio (CaCO_3) na redução do teor de sílica reativa durante o processo de moagem de bauxita. A metodologia consistiu em ensaios de moagem a úmido utilizando moinhos de bolas e de barras, variando-se o tempo de moagem (4 e 8 minutos) e a dosagem de aditivo (0%, 5%, 10% e 20%). Os resultados indicaram que o moinho de bolas foi ineficiente na redução de sílica reativa. Em contrapartida, o moinho de barras apresentou alta eficiência. O melhor cenário ocorreu em 8 minutos, com 20% de CaCO_3 , resultando em redução de 35,87% no teor de sílica reativa em relação à amostra referencial. Contudo, observou-se uma correlação inversa com os teores de alumina aproveitável, que decaíram de 34,20% para 25,70% na mesma condição. A literatura explica que as mudanças mineralógicas devido às reações mecanicoquímicas podem justificar tais variações. Dessa forma, o trabalho mostrou que o método testado é tecnicamente viável, porém exige calibração rigorosa na dosagem industrial para otimizar a inativação da sílica sem perdas severas de alumina.

Palavras-chave: Bauxita. Processo Bayer. Moagem. Caulinita. Alumina.

ABSTRACT

The presence of reactive silica in metallurgical bauxite represents a significant challenge in the Bayer process, increasing reagent consumption and operational costs in alumina production. Milling, one of the stages of mineral processing, combined with additives and based on mechanochemical principles, emerges as a promising alternative to inactivate this reactive silica through the application of mechanical energy. The objective of this study was to evaluate the effect of adding calcium carbonate (CaCO_3) on the reduction of reactive silica content during the bauxite milling process. The methodology consisted of wet milling tests using ball and rod mills, varying the milling time (4 and 8 minutes) and additive dosage (0%, 5%, 10%, and 20%). The results indicated that the ball mill was inefficient in reducing reactive silica. In contrast, the rod mill showed high efficiency. The best scenario occurred at 8 minutes, with 20% CaCO_3 , resulting in a 35.87% reduction in reactive silica content compared to the reference sample. However, an inverse correlation was observed with the available alumina contents, which decreased from 34.20% to 25.70% under the same condition. The literature explains that mineralogical changes due to mechanochemical reactions can justify such variations. Thus, the study showed that the tested method is technically viable but requires rigorous calibration of the industrial dosage to optimize silica reduction without severe alumina losses.

Keywords: Bauxite. Bayer Process. Milling. Kaolinite. Alumina.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	OBJETIVOS.....	10
1.1.1	Objetivo Geral.....	10
1.1.2	Objetivos Específicos.....	10
2	DESENVOLVIMENTO.....	10
2.1	JUSTIFICATIVA.....	10
2.2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.2.1	Bauxita: reservas, produção, composição e uso.....	11
2.2.2	Aplicações do Alumínio.....	16
2.2.3	Extração de Alumínio da bauxita.....	16
2.2.4	O problema da sílica reativa.....	18
2.2.5	Reações Mecanoquímicas.....	19
2.2.6	Alternativas para redução de sílica reativa por meio de reações mecanoquímicas.....	20
2.2.7	Importância da inserção de circularidade na cadeia produtiva do alumínio.....	22
2.3	METODOLOGIA.....	23
2.3.1	Preparação do Minério de estudo.....	24
2.3.2	Testes Laboratoriais de Moagem.....	24
2.3.3	Caracterização e Análise Química.....	27
2.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
2.4.1	Caracterização.....	28
2.4.2	Efeito do Esforço Mecânico: Moinho de Bolas vs. Barras.....	29
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
3.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	34
	REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

A indústria de mineração desempenha papel central no desenvolvimento econômico e industrial global, sendo responsável pelo fornecimento de matérias-primas essenciais aos mais diversos setores produtivos. No entanto, à medida que as reservas de minérios de alta qualidade se tornam mais escassas, a exploração de depósitos com teores mais baixos e com maior presença de impurezas tem se intensificado, impondo novos desafios técnicos e econômicos no setor (WILLS; FINCH, 2015). Nesse cenário, o beneficiamento mineral assume papel cada vez mais estratégico, exigindo o desenvolvimento e a aplicação de métodos mais eficientes (LUZ et al., 2010).

O processo Bayer é tradicionalmente utilizado para a produção de alumina (Al_2O_3) a partir do minério de bauxita (GOW; LOZEJ, 1993). Inicialmente, a bauxita é lixiviada com hidróxido de sódio concentrado (NaOH), em condições de temperatura e pressão elevadas, o que resulta na dissolução dos óxidos de alumínio. A lama vermelha, como é conhecido o conjunto de materiais insolúveis resultantes, é separada por clarificação. Após o resfriamento do licor, ocorre a precipitação de alumina trihidratada ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), que é calcinada, formando alumina.

Um dos principais problemas na produção de alumínio ocorre quando se constata a alta presença de sílica reativa (SR) no minério. No processo Bayer a SR corresponde à sílica que dissolve na lixiviação básica, e está predominantemente associada à caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), representando um dos maiores obstáculos na produção de alumina (PAZ; ANGÉLICA; KAHN, 2017). Sua concentração elevada, especialmente quando ultrapassa os parâmetros de tolerância industriais de 4% a 5% (GOW; LOZEJ, 1993), é desfavorável em diversas etapas dos processos industriais, influenciando tanto a eficiência do beneficiamento quanto a qualidade do produto (SMITH, 2009). A sílica reage com o hidróxido de sódio utilizado na produção, gerando compostos que consomem reagentes e reduzem o rendimento do processo.

Portanto, a remoção ou redução da SR é um objetivo prioritário no beneficiamento da bauxita (SMITH, 2009). Esse controle é essencial pois a SR e a alumina aproveitável (AA), definida como a quantidade de alumina que pode ser extraída da bauxita em solução pelo processo Bayer, apresentam uma relação antagônica. Assim, o sucesso do beneficiamento depende intrinsecamente da capacidade de mitigar o impacto da SR para preservar a eficiência da extração da AA (GOW; LOZEJ, 1993).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da adição de carbonato de cálcio na redução do teor de sílica reativa durante o processo de moagem de bauxita.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Comparar a eficiência do esforço mecânico entre o moinho de bolas e o moinho de barras na inativação da sílica reativa em polpas de alta densidade;
- b) Analisar a influência do tempo de moagem e da dosagem de carbonato de cálcio na inativação da sílica reativa;
- c) Avaliar o impacto (*trade-off*) da adição do aditivo cálcico sobre os teores finais de alumina aproveitável (alumínio dissolvido no processo Bayer) e sílica reativa, visando identificar o ponto de equilíbrio ótimo para a aplicação industrial.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 JUSTIFICATIVA

No processamento convencional, as formas mais comuns de reduzir o teor de SR na alimentação do processo Bayer, cujo teor limite costuma ser inferior a 5% nas plantas brasileiras, consistem na blendagem de minérios de diferentes origens e na lavagem. A lavagem envolve atrição seguida de classificação, em que a caulinita se concentra nos finos sendo fisicamente removida (PAZ; ANGÉLICA; KAHN, 2017). Entretanto, a dependência exclusiva dessas abordagens restringe a aplicação em determinadas indústrias. No caso da lavagem, há um aumento da preocupação com o meio ambiente devido ao elevado consumo de água e à geração de um rejeito adicional, constituído exatamente por essa fração fina rica em argilominerais separada durante o processo, que se soma ao passivo ambiental da lama vermelha gerada posteriormente (VICK, 1983).

Para enfrentar esse desafio, a ativação mecanoquímica com aditivos cálcicos surge como uma alternativa promissora. Trabalhos da literatura sugerem que a adição de fontes de cálcio pode reduzir o teor de SR de bauxita por meio de reações mecanoquímicas dentro de equipamentos de cominuição. Esta tecnologia traria benefícios à cadeia produtiva do alumínio, sendo uma solução viável para a problemática em questão (McCORMICK; PICARO; SMITH, 2002; REIS et al., 2024).

No entanto, apesar do crescente interesse na aplicação dessa técnica como pré-tratamento para diferentes tipos de minérios, ainda há poucos estudos na literatura focados na interação específica entre o minério bruto e o carbonato de cálcio (CaCO_3), um reagente de baixo custo e alta disponibilidade, inclusive disponível como rejeito de operações industriais. O entendimento dos mecanismos envolvidos nessa interação é fundamental para avaliar o potencial de aplicação do método em escala industrial, contribuindo para o desenvolvimento de rotas mais sustentáveis (SANTOS, 2013).

O presente trabalho investiga a ação do CaCO_3 , proveniente do rejeito gerado no próprio processo de beneficiamento da bauxita, na redução de SR da bauxita. Portanto, além dos aspectos técnicos de otimização metalúrgica no processo Bayer, a relevância deste estudo fundamenta-se na sustentabilidade por meio do reaproveitamento de subprodutos. A reutilização desse material mitiga os impactos associados ao seu descarte inadequado, conferindo um direcionamento produtivo e de valor agregado a um resíduo que, de outra forma, se consolidaria como um passivo ambiental, alinhando-se aos preceitos da economia circular (CAMILO, 2019).

2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.2.1 Bauxita: reservas, produção, composição e uso

A composição mineralógica da bauxita é heterogênea, constituída primariamente por minerais portadores de alumínio e os principais são: gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$, a boehmita $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ e o diásporo $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$, enquanto suas impurezas mais comuns incluem caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, quartzo SiO_2 e hematita Fe_2O_3 . Na Tabela 1 são apresentados esses minerais e suas principais características (PAZ; ANGÉLICA; KAHN, 2017).

Tabela 1 – Descrição dos principais minerais de alumínio contidos nas bauxitas refratárias.

Mineral	Gibbsita	Boehmita	Diásporo
Fórmula química	$\text{Al}(\text{OH})_3 - \gamma$	$\text{AlOOH} - \gamma$	$\text{AlOOH} - \alpha$
$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{H}_2\text{O}$	1: 3	1: 1	1: 1
Sistema cristalino	Monoclínico	Ortorrômbico	Ortorrômbico
Dureza Mohs	2,5-3,5	3,5-4,0	6,5-7,0
Densidade (g/cm^3)	2,42	3,01	3,44
Índice de refração	1,568	1,649	1,702
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de desidratação	150	350	450
Produto de desidratação	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \chi$	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \gamma$	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \alpha$
Solubilidade	128	54	Insolúvel
$(\text{g Al}_2\text{O}_3/\text{L}) (*)$			

(*) Em solução de Na_2O a 100 g/L, a 125 $^{\circ}\text{C}$.

Fonte: Adaptado de Habashi (1993).

As impurezas presentes na bauxita incluem principalmente óxidos de ferro, como hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e goethita ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$), além de sílica, óxido de titânio (TiO_2) e aluminossilicatos (PAZ; ANGÉLICA; KAHN, 2017). A quantidade destes constituintes varia conforme a região de origem do minério, o que influencia diretamente suas características físicas. Como resultado, a bauxita pode apresentar aspectos bastante distintos, variando desde um material de coloração marrom-escuro até um sólido mais claro, com textura mais dura, porém cristalina. Essa variabilidade pode ocorrer inclusive dentro de um mesmo depósito, refletindo a heterogeneidade do processo de formação do minério (PRADO et al., 2012).

De modo geral, a composição química típica da bauxita de uso industrial inclui teores de alumina (Al_2O_3) entre 40% e 60%, água combinada entre 12% e 30%, sílica (SiO_2) entre 1% e 15%, óxidos de ferro (Fe_2O_3) entre 1% e 30%, óxido de titânio (TiO_2)

na faixa de 3% a 4%, além de pequenas quantidades de outros elementos, geralmente entre 0,05% e 0,2% (KIRK-OTHMER, 1992).

Apesar de ser frequentemente descrita como o principal minério de alumínio, a bauxita não constitui uma espécie mineral única, mas sim um material heterogêneo formado por uma mistura de hidróxidos de alumínio hidratados (Tabela 1), associados a diversas impurezas (HABASHI, 1993). As bauxitas geologicamente mais recentes apresentam elevado teor de gibbsita, sendo amplamente distribuídas em regiões de clima tropical, como Jamaica, Brasil, Austrália, Guiné, Guiana, Suriname e Índia. Essas ocorrências são caracterizadas em depósitos com formações ricas em óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, que apresentam maior interesse econômico devido à sua elevada concentração de alumina disponível e melhor desempenho nos processos industriais de obtenção de alumínio (PRADO et al., 2012).

A bauxita apresenta uma ampla gama de aplicações industriais, as quais estão diretamente relacionadas à sua composição química e mineralógica (PRADO et al., 2012). Ela mantém-se consolidada como a matéria-prima essencial para a cadeia produtiva global, com a destinação predominante de sua extração voltada à obtenção de alumina (processo Bayer) para a produção de alumínio metálico (processo Hall Héroult) (ANM, 2025). A fração não metalúrgica do minério continua sendo estrategicamente utilizada em aplicações industriais, como refratários e abrasivos (PRADO et al., 2012).

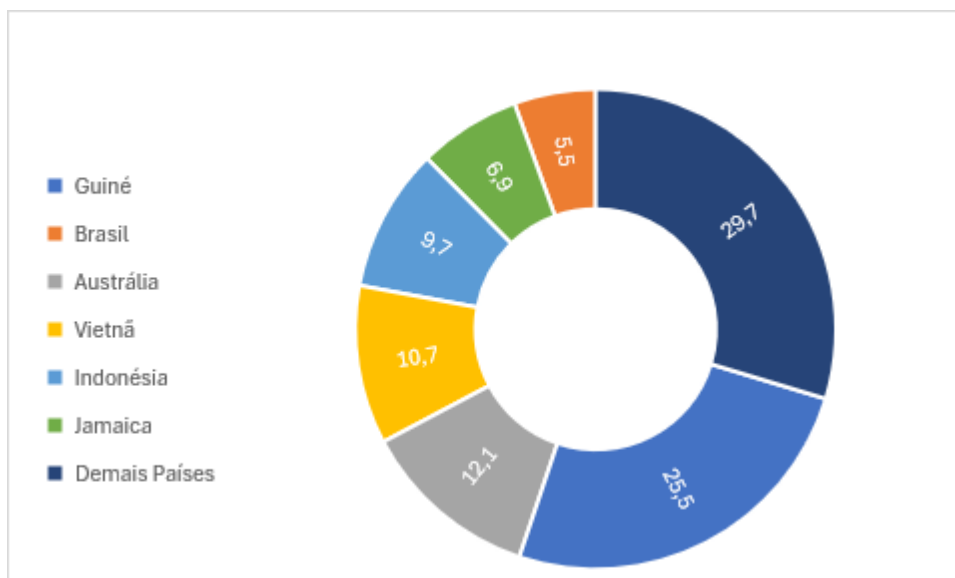
No setor de refratários, a utilização dessa matéria-prima possui relevância técnica consolidada, destacando-se pela possibilidade de substituir parcial ou totalmente agregados tradicionais, como a alumina eletrofundida, tanto em materiais conformados quanto monolíticos. Historicamente, essa viabilidade técnica foi estabelecida devido, principalmente, às suas propriedades intrínsecas de elevada refratariedade, resistência a altas temperaturas e estabilidade química (ALQUINO, 2007; PRADO et al., 2012).

Além disso, a bauxita se destaca por apresentar custo relativamente inferior quando comparada a materiais sintéticos de alto desempenho, o que a torna uma alternativa economicamente viável para diversas aplicações industriais. Dessa forma, seu uso no desenvolvimento de materiais refratários contribui não apenas para a otimização de custos, mas também para a diversificação das matérias-primas empregadas nesse setor.

De acordo com dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), identificou-se

que as reservas mundiais de bauxita foram estimadas em aproximadamente 29 bilhões de toneladas, distribuídas como mostrado na figura 1.

Figura 1 – Principais reservas mundiais de bauxita.



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Mineração (2025).

As reservas brasileiras de bauxita totalizam 1,62 bilhão de toneladas, sendo divididas em 897 milhões de toneladas de reservas provadas e 720 milhões de toneladas de reservas prováveis. Com esse montante, o Brasil detém uma posição de grande relevância no cenário global, concentrando 5,5% das reservas mundiais do minério (AMN, 2025). O principal polo dessa riqueza mineral concentra-se no Estado do Pará, que ocupa uma posição de absoluto destaque na produção nacional. (DUARTE et al., 2023; PRADO et al., 2012).

Em termos de produção, o país respondeu por 7,1% do total extraído globalmente em 2024, registrando um volume de aproximadamente 31,8 milhões de toneladas de bauxita beneficiada. Desse montante nacional, o Estado do Pará foi responsável por 29,5 milhões de toneladas, o que equivale a 92,6% de toda a produção brasileira. Esse desempenho consolidou o minério como um ativo estratégico na pauta econômica do país, gerando, em 2024, uma arrecadação de R\$ 164,86 milhões em CFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais), da qual o Pará também liderou como o principal estado arrecadador, com 93,5% do total (ANM, 2025). O panorama da produção mundial, que detalha a posição do Brasil em relação aos demais países líderes na extração de bauxita, é apresentado

na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais países produtores de bauxita – 2024.

Países	Produção (10 ³ t)	Participação (%)
Brasil	31.849	7,1
Austrália	130.000	28,9
Guiné	100.000	22,22
China	93.000	20,7
Indonésia	32.000	7,1
Índia	25.000	5,6
Outros Países	38.151	8,5
Total	450.000	100

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Mineração (2025).

As normas técnicas utilizadas no setor minerário, a exemplo da ABNT NBR 15944, classificam a qualidade da bauxita quanto aos teores de AA e SR, que correspondem à quantidade de alumínio e sílica que dissolvem na lixiviação do processo Bayer. Em depósitos brasileiros, especialmente na região Norte, são observados teores de SR que podem atingir valores muito superiores em determinados horizontes mineralógicos. Embora parâmetros ideais indiquem que a SR deve ser inferior a 4% (GOW; LOZEJ, 1993), a operação torna-se um problema crítico e tem sua utilização direta inviabilizada no processo Bayer apenas quando o minério apresenta concentrações expressivamente mais altas (ANM, 2025).

O estado de Minas Gerais possui menor participação nacional atualmente, entretanto, sua relevância histórica merece destaque. Com atividades iniciadas em 1940, a cidade de Poços de Caldas, localizada no sul de Minas Gerais, foi o grande polo industrial de exploração de bauxita. As jazidas de minério do estado se concentram na Zona da Mata e no Sul de Minas e possuem características distintas do minério encontrado no estado do Pará: sua formação geológica mais antiga associada com a maior presença de argilominerais, mostra que a eficiência no

processo de extração da alumina é menor e que a presença de SR é bem forte no minério da região (DUARTE et al., 2023).

2.2.2 Aplicações do Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento químico mais abundante na crosta terrestre, ficando atrás apenas do oxigênio e do silício, e representando cerca de 7% de sua massa total (LUMLEY, 2011). Apesar de sua elevada abundância, o alumínio não é encontrado livre na natureza, ocorrendo principalmente na forma de compostos, especialmente como alumina hidratada presente em rochas residuais denominadas bauxitas. Assim, a bauxita constitui a principal matéria-prima para a produção de alumínio primário, mantendo-se, ainda hoje, como a fonte mais importante para obtenção industrial desse metal (TINOCO, 2017).

As aplicações do alumínio (Al) obtido após o refino da bauxita são vastas e estratégicas para a economia moderna. Devido às suas propriedades combinadas de leveza estrutural, alta condutividade elétrica e térmica, maleabilidade e excelente resistência passivada à corrosão, o alumínio é amplamente utilizado em escalas maciças na indústria automobilística e aeroespacial, na fabricação de embalagens sustentáveis, na construção civil e na transmissão de energia elétrica (SMITH, 2009).

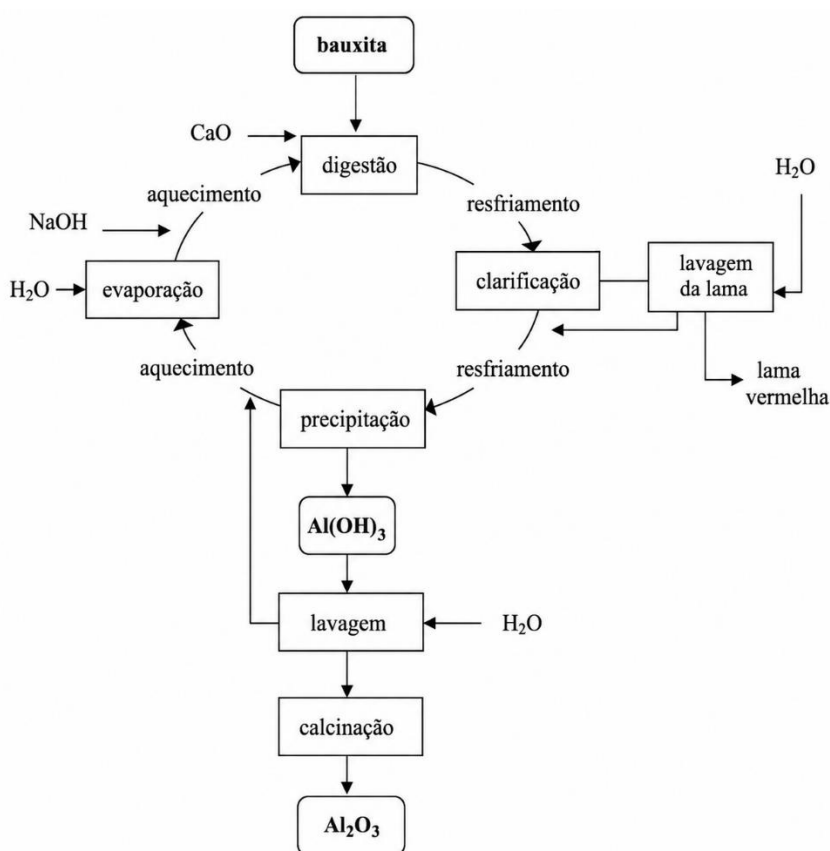
2.2.3 Extração de Alumínio da bauxita

A produção de alumina ocorre quase exclusivamente por meio do Processo Bayer. Neste processo, o minério é submetido à digestão alcalina utilizando hidróxido de sódio sob condições de temperatura e pressão elevadas. As impurezas insolúveis formam um resíduo conhecido como lama vermelha, que é separado numa operação de separação sólido-líquido. Em seguida, ocorrem as duas últimas operações essenciais: a precipitação da alumina tri-hidratada a partir da solução e a etapa final de calcinação (a cerca de 1000 °C), formando a alumina de alta pureza (GOW; LOZEJ, 1993). Um exemplo simplificado de como esse processo ocorre é apresentado na Figura 2.

No processo Bayer, aproveita-se uma característica importante dos principais minerais de alumínio presentes na bauxita, como a gibbsita: a solubilidade em uma solução de soda cáustica (NaOH) sob determinadas condições de temperatura e

pressão, ao contrário da maioria das impurezas do minério. As condições da etapa de digestão podem variar dependendo do tipo de mineral presente, já que a gibbsita se dissolve com maior facilidade em comparação às demais formas. Por isso, quando a bauxita apresenta uma mistura desses minerais, o processo é ajustado considerando aquele de menor solubilidade. Dessa forma, a extração de alumina a partir de bauxitas ricas em gibbsita tende a ser mais econômica, pois exige condições menos severas de operação (CONSTANTINO et al., 2002).

Figura 2 - Diagrama simplificado do processo Bayer.



Fonte: CONSTANTINO et al. (2002).

Durante a etapa de digestão do processo Bayer, a adição de **CaO** tem como principal função promover a redução de impurezas dissolvidas, como íons carbonato e fosfato, por meio de sua precipitação. Após essa etapa, ocorre a clarificação, que consiste na separação do resíduo sólido rico em óxidos de ferro, conhecido como lama vermelha, da solução contendo aluminato de sódio ($\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$). Em seguida, o licor clarificado é resfriado, permitindo a precipitação do hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) a partir da adição de sementes cristalinas. Após a remoção do precipitado, o licor

alcalino remanescente é concentrado por evaporação e reutilizado no processo, retornando à etapa de digestão. Por fim, a maior parte do hidróxido de alumínio obtido é submetida à calcinação para produção de alumina (Al_2O_3), enquanto uma pequena fração pode ser apenas seca e utilizada diretamente (CONSTANTINO et al., 2002).

Como exemplo prático nacional, a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), em suas unidades de Miraf e Itamarati de Minas (MG), emprega rotas de lavagem utilizando equipamentos como o Scrubber (tambor desagregador) para promover a desagregação do minério e a remoção de partículas finas, denominada escrubagem (MASSOLA, 2008). Essa escrubagem, geralmente associada a etapas de classificação granulométrica, permite separar a fração fina indesejada rica em argilominerais, reduzindo a concentração de SR na bauxita antes da alimentação do processo Bayer (MASSOLA, 2008).

2.2.4 O problema da sílica reativa

No beneficiamento da bauxita, a SR, predominantemente associada à caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), representa um dos maiores obstáculos no processo Bayer de produção de alumina. Durante a etapa de digestão, a sílica reage rapidamente com a soda cáustica (NaOH) e com o alumínio dissolvido (SMITH, 2009). Essa reação forma o Produto de Desilicação (DSP), um silicato sólido que prejudica a eficiência do processo de duas maneiras: ele causa a perda direta do alumínio que viraria o produto final e consome muito hidróxido de sódio, que acaba perdido e não pode ser reaproveitado no ciclo (PAZ; ANGÉLICA; KAHN, 2017). Sua presença em concentrações elevadas é desfavorável em diversas etapas dos processos industriais, influenciando tanto a eficiência do beneficiamento quanto a qualidade do produto final, elevando os custos operacionais. Como esses silicatos interagem de forma muito complexa com o líquido do processo, é necessário um acompanhamento contínuo, pois os novos compostos sólidos que se formam durante o aquecimento são muito reativos (HIND; BHARGAVA; GROCOTT, 1999).

A sílica constitui uma das principais impurezas presentes nos minérios de bauxita, ocorrendo geralmente na forma de quartzo (SiO_2). Em bauxitas com elevado teor de sílica, especialmente quando a fração reativa ultrapassa aproximadamente 8%, o processamento por rotas convencionais torna-se economicamente inviável. Além disso, com o aumento da demanda por alumina, observa-se o esgotamento

progressivo das jazidas de melhor qualidade, o que tem levado ao uso crescente de bauxitas com maiores teores de sílica. Nesse contexto, o desenvolvimento de métodos eficientes para o aproveitamento desses minérios torna-se um desafio relevante e estratégico para a indústria do alumínio (SUN et al., 2023).

2.2.5 Reações Mecanoquímicas

As reações mecanoquímicas surgem como uma alternativa inovadora e com grande potencial para o tratamento de minérios. Essa área une a ciência dos materiais com a química do estado sólido e é reconhecida pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) como o estudo de reações químicas que ocorrem por causa da absorção direta de energia mecânica (IUPAC, 2004).

Nesse caso, a cominuição não serve apenas para diminuir o tamanho das partículas. O forte estresse mecânico aplicado pelos equipamentos de fragmentação é capaz de quebrar ligações químicas, gerar calor no contato entre as partículas e criar defeitos na estrutura dos minerais (BALÁŽ, 2008). Isso permite que aconteçam reações químicas sem aquecimento externo significativo que seriam muito difíceis ou até impossíveis de ocorrer nos métodos comuns, abrindo portas para o desenvolvimento de novos processos de beneficiamento (SUN et al., 2023).

Para que essas transformações ocorram de forma efetiva, são geralmente utilizados moinhos de alta energia, como os moinhos de bolas ou de barras. Equipamentos convencionais de baixa energia frequentemente se mostram insuficientes para promover essas mudanças na estrutura (LUZ et al., 2010). Historicamente, a literatura clássica define essas transformações como resultado direto do acúmulo de defeitos cristalinos e do estresse mecânico (HEINICKE, 1984). A aplicação dessa energia afeta, não apenas a forma das partículas, mas a própria termodinâmica dos minerais.

A moagem mecânica de alta energia é um processo no qual materiais particulados finos são obtidos por meio de sucessivos eventos de deformação plástica, união entre partículas e posterior fragmentação, realizados em moinhos de alta energia, como os planetários, vibratórios ou atritores, que operam com alta intensidade de impacto (BALÁŽ, 2008). Essa técnica permite a formação de materiais com características específicas, incluindo fases metaestáveis e melhora na trabalhabilidade dos materiais particulados. Nesse contexto, a moagem envolvendo

reações mecanoquímicas pode ser entendida como uma vertente da moagem mecânica, na qual a energia transferida durante o processo promove não apenas alterações físicas, mas também reações químicas e mudanças estruturais. Essas transformações ocorrem devido às intensas colisões entre as esferas de moagem, as partículas do pó e as paredes do recipiente, responsáveis pela elevada energia transferida ao sistema (SILVA et al., 2012).

A ativação mecânica tem encontrado aplicação em diversas indústrias, incluindo metalurgia extrativa, aproveitamento de resíduos e síntese de ligas metálicas. No beneficiamento mineral, essa técnica apresenta a vantagem de permitir o uso de condições de processamento mais moderadas em comparação com as abordagens convencionais, como temperaturas mais baixas e tempos de operação reduzidos, o que contribui para a redução do consumo energético, da geração de resíduos e das emissões de gases poluentes (SILVA et al., 2002).

O método mecanoquímico é amplamente utilizado na fabricação de diversos materiais avançados, tanto metálicos quanto não metálicos, permitindo a obtenção de materiais nanoestruturados com características cristalinas e/ou amorfas. Nas últimas décadas, esse método tem sido aplicado na síntese de materiais em pó, principalmente devido à sua capacidade de reduzir o tempo de reação, diminuir a necessidade de altas temperaturas e possibilitar a obtenção de materiais com propriedades específicas e controladas (SILVA et al., 2002).

2.2.6 Alternativas para redução de sílica reativa por meio de reações mecanoquímicas

Diferente dos métodos de lavagem, que buscam separar fisicamente os argilominerais, a aplicação do esforço mecânico atua como um pré-tratamento químico do minério bruto. O objetivo dessa abordagem é inativar a SR antes que ela entre na etapa de digestão do Processo Bayer. A alta energia inserida no sistema durante a moagem promove o contato íntimo e forçado entre as partículas de sílica e os aditivos adicionados (como fontes de cálcio), induzindo a formação prematura de compostos estáveis e insolúveis (McCORMICK; PICARO; SMITH, 2002).

Dessa forma, ao invés de tentar remover a impureza da bauxita, a rota mecanoquímica bloqueia a capacidade da sílica de reagir com a soda cáustica e com o alumínio posteriormente, atacando a raiz do problema das perdas cáusticas e

elevando a eficiência global do beneficiamento.

Estudos sobre a ativação mecanoquímica de minérios já foram realizados com diferentes reagentes e objetivos. No caso da bauxita, pesquisas têm explorado o uso de reagentes como CaO , Ca(OH)_2 e CaCO_3 em processos de moagem, buscando formar compostos capazes de incorporar a SR e transformá-la em fases insolúveis e estáveis antes das etapas seguintes de processamento (McCORMICK; PICARO; SMITH, 2002).

Entre os reagentes já estudados, o CaCO_3 apresenta-se como uma opção em razão de sua disponibilidade, baixo custo de obtenção e potencial de interação química. Quando introduzido na moagem junto com o minério bruto, a energia mecânica aplicada promove reações na interface sólido-sólido entre o CaCO_3 e os minerais silicosos, alterando a reatividade dessa impureza e reduzindo seu teor de maneira significativa.

Para fundamentar a eficácia dessa interação, destaca-se a pesquisa de McCormick, Picaro e Smith (2002), que atestam em citação direta: “a moagem de bauxita com cal resulta na formação de uma fase hidrogranada cálcica insolúvel $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_{12-4}$, que previne a dissolução da SR durante a digestão Bayer subsequente”.

Recentemente, ensaios realizados com bauxita amazônica reforçaram a viabilidade do processo com aditivos de cálcio. Sobre os resultados obtidos, Reis et al. (2024, p. 230) concluem que:

[...] a ativação mecanoquímica com cal pode ser uma solução para reduzir as perdas cáusticas da sílica reativa na bauxita amazônica através da formação de hidrogranadas de grossulária não reativas. A estimativa de redução no consumo de cáusticos na refinaria associada à ativação mecanoquímica com 0,5% de cal é de 5,4 kg/tonelada de bauxita.

Apesar do crescente interesse na aplicação da ativação mecânica como pré-tratamento, ainda há poucos estudos na literatura no que diz respeito à interação específica entre o CaCO_3 e minérios brutos, assim como à eficácia desse processo na redução do teor de SR. Entender e estudar os mecanismos envolvidos nessa interação e identificar seus efeitos é fundamental para avaliar o potencial de aplicação

da mecanoquímica em escala industrial. Experimentos específicos demonstram que a ativação mecânica da bauxita promove quebras progressivas na estrutura dos argilominerais, elevando a eficiência da inativação e da lixiviação antes mesmo da etapa de digestão (ALEX et al., 2014).

2.2.7 Importância da inserção de circularidade na cadeia produtiva do alumínio

A urgência por práticas operacionais sustentáveis na engenharia impulsionou a adoção de novos paradigmas produtivos, em resposta à crescente geração de rejeitos industriais. No contexto nacional, o mapeamento e a estimativa do fluxo de resíduos apontam para a necessidade crítica de reinserção desses materiais no ciclo produtivo, atuando como um pilar fundamental para a sustentabilidade e a preservação ambiental no Brasil (FRANCO; LANGE, 2011). Globalmente, essa transição global exige o abandono dos modelos clássicos de extração e descarte, caminhando de forma definitiva rumo a sistemas econômicos mais equilibrados e sustentáveis (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

Lottermoser (2007) explica que, as atividades da indústria mineral são divididas em três etapas principais: lavra, beneficiamento e extração metalúrgica. A lavra corresponde à fase inicial, na qual ocorre a retirada do material do subsolo com o objetivo de obter o minério de interesse. Em seguida, o beneficiamento tem como finalidade separar e concentrar o minério por meio de processos físicos. Por fim, na etapa de extração metalúrgica, o material beneficiado passa por transformações químicas que permitem a obtenção do metal desejado.

Os rejeitos de mineração são, em geral, misturas com elevada presença de água, resultantes das etapas de lavagem utilizadas no processamento mineral. Esse processo tem como objetivo separar as frações finas das frações mais grossas, nas quais normalmente se encontra o minério de interesse. Após essa etapa, os rejeitos são comumente transportados por via hidráulica e armazenados em estruturas como diques ou barragens. De acordo com Vick (1983), esses rejeitos correspondem a partículas provenientes da fragmentação de rochas ou de operações de concentração, sendo geralmente depositados na forma de lama. Essa definição abrange os resíduos gerados tanto no beneficiamento quanto no processamento mineral, que permanecem após a extração dos minerais de valor econômico.

Em um levantamento realizado por van Deursen (2016), é apresentada a

quantidade de rejeitos gerados a partir da lavagem por algumas empresas mineradoras de bauxita no Brasil, conforme consolidado na Tabela 3.

Tabela 3 – Quantidade de rejeitos gerados a partir da produção de bauxita lavada em empresas mineradoras no Brasil.

Mineradora	R.O.M. Lavrado (Mt)	Bauxita Beneficiada (Mt)	Rejeito Seco (Mt)	Rejeito na base úmida (Mt)
MRN – Oriximá/ 2012	25.7	18.0	7.7	14.0
Norsk Hydro – Paragominas/ 2015	13.14	9.2	3.9	6.6
CBA – Miraf / 2008	7.5	3.0	4.5	10.0

Fonte: Adaptado de van Deursen (2016).

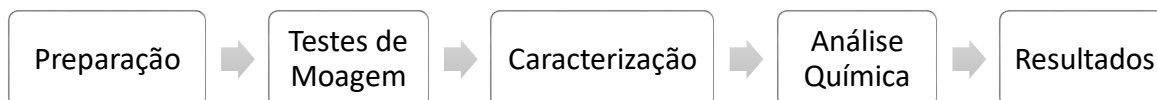
A transição de um modelo econômico linear para um modelo circular é uma diretriz estratégica na indústria mineral contemporânea. Nesse cenário, a ativação utilizando o CaCO_3 residual, especialmente aquele gerado como rejeito em etapas adjacentes do próprio beneficiamento da bauxita, alinha-se diretamente com os preceitos da economia circular (CAMILO, 2019). Ao introduzir um rejeito industrial como agente ativo na moagem da bauxita, promove-se o conceito de simbiose industrial, no qual o subproduto de uma cadeia produtiva torna-se insumo essencial para outra. Essa abordagem reduz tanto a dependência de matérias-primas virgens quanto o volume de resíduos destinados a depósitos, minimizando a pegada ambiental do beneficiamento mineral. A literatura global de hidrometalurgia reforça que a busca por aplicações viáveis para resíduos metalúrgicos é vital para a sustentabilidade do setor (KLAUBER; GRÄFE; TSCHIRNER, 2011), uma vez que o processamento tradicional gera altos volumes de passivos que exigem metodologias inovadoras de reaproveitamento (KUMAR; KUMAR; BANDOPADHYAY, 2006).

2.3 METODOLOGIA

A metodologia consistiu nas seguintes etapas: Preparação, Testes de Moagem,

Análise Química e Resultados, conforme ilustrado no fluxograma geral da Figura 3.

Figura 3 – Fluxo das etapas da metodologia.



Fonte: Elaborada pelas autoras (2026).

2.3.1 Preparação do minério de estudo

A aproximação com o objeto de pesquisa originou-se durante o período de estágio realizado pelas autoras em uma empresa de mineração localizada em Poços de Caldas, no sul de Minas Gerais. As amostras de minério bruto utilizadas neste estudo foram coletadas na mina da referida empresa por meio de amostragem representativa. Após a coleta, o material foi submetido à britagem em um britador de martelos para atingir uma granulometria primária 100% passante em malha de 6,35 mm (1/4").

Em seguida, procedeu-se à homogeneização do material britado utilizando o método de pilha alongada. O material restante foi distribuído em alíquotas de 1 kg para alimentar os ensaios de moagem. Para garantir o aporte energético necessário e favorecer a ocorrência das reações mecanoquímicas, a etapa de moagem não foi balizada por uma granulometria de saída fixa, mas sim conduzida sob controle de tempo, estabelecendo-se períodos predeterminados de 4 e 8 minutos para os testes.

2.3.2 Testes Laboratoriais de Moagem

Os ensaios foram executados na Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), no *campus* Poços de Caldas, pelas autoras. Utilizou-se um moinho de carga cadente de laboratório (Figura 3), equipado com um jarro (Figura 4) medindo 8x10 polegadas (20x25 cm) e volume total de 8.243,3 cm³. Para garantir a equivalência da energia fornecida, variou-se a geometria da carga entre bolas e barras, mantendo o percentual de preenchimento do volume do jarro fixo em 23,5%. Nos ensaios com bolas, utilizou-se uma carga composta por 462 bolas de aço com diâmetro de 20 mm, totalizando um volume de 1.934,4 cm³ (Figura 5). Já nos ensaios com barras,

empregaram-se 15 barras de aço com dimensões de 10x1 polegadas, totalizando um volume de 1.936,2 cm³ (Figura 6).

Figura 3 – Moinho de carga cadente.



Fonte: Autoras (2026).

Figura 4 – Jarro.



Fonte: Autoras (2026).

Figura 5 – Carga de bolas.



Fonte: Autoras (2026).

Figura 6 – Carga de barras.



Fonte: Autoras (2026).

Durante os testes, o sistema operou com um fator de enchimento global do moinho de 28,5%. A velocidade crítica do equipamento foi calculada em 93,8 rpm, e a velocidade de operação foi estabelecida em 45 rpm, o que corresponde a 48% da velocidade crítica.

A moagem foi conduzida com uma concentração de sólidos em massa de 60%, exigindo a adição de 666 g de água para 1 kg de minério.

A variável de estudo consistiu na dosagem do aditivo CaCO_3 , variando em quatro cenários: 0% (controle), 5%, 10% e 20%. Uma decisão metodológica fundamental foi a não inclusão de soda cáustica na moagem, visando isolar a variável e evitar precipitações prematuras na estufa. Para analisar a evolução do processo sob a perspectiva das reações mecanoquímicas, as amostras foram submetidas a dois tempos de residência: 4 e 8 minutos. A matriz completa das 16 condições experimentais avaliadas está resumida na Tabela 4.

Tabela 4 - Condições experimentais dos ensaios de moagem a úmido.

Ensaio	Corpo Moedor	Tempo de Residência (minutos)	Dosagem de CaCO_3 (%)
01 a 04	Barras	4	0; 5; 10; 20
05 a 08	Barras	8	0; 5; 10; 20
09 a 12	Bolas	4	0; 5; 10; 20
13 a 16	Bolas	8	0; 5; 10; 20

Fonte: Elaborada pelas autoras (2026).

2.3.3 Caracterização e Análise Química

Após a etapa de moagem, as polpas resultantes foram secas, destorroadas e quarteadas. Alíquotas de 10 g de cada uma das 16 condições foram separadas e, após todas as etapas anteriores realizadas na universidade, encaminhadas para análise laboratorial em um laboratório dedicado de Bauxita, localizado na cidade de Miraí, em Minas Gerais. Além de avaliar a eficiência do tratamento através dos teores finais de SR e AA, realizou-se a determinação do Ferro Total e da Sílica Total. As quantificações seguiram os protocolos internos da indústria para os compostos globais e digestão simulada para os compostos reativos, empregando-se os métodos analíticos de Espectrometria de Raios X, Titulometria e Espectrometria de Plasma Óptico (ICP-OES) (COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO, 2025a; 2025b). Os produtos correspondentes ao ensaio controle (0% de CaCO_3) com barras e bolas nos

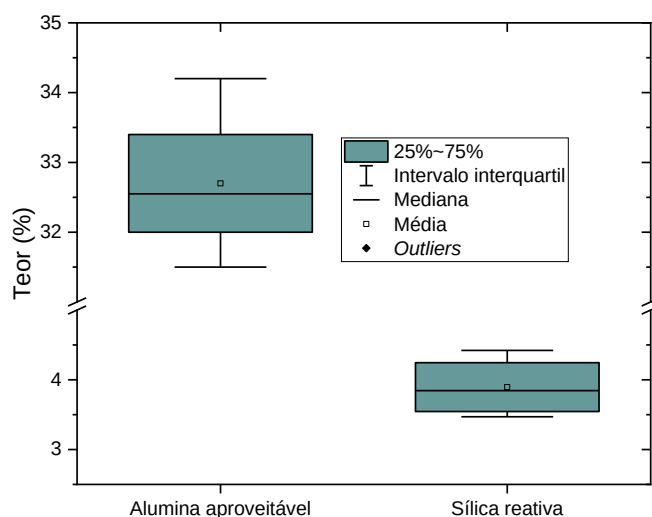
tempos de 4 e 8 min foram também submetidos a análise granulométrica por peneiramento a úmido nas malhas de abertura 212, 150, 106, 75, 63 e 45 μm .

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.4.1 Caracterização

A Figura 4 apresenta o diagrama de caixa (boxplot) dos valores de AA e SR, obtidos a partir de quatro análises de caracterização dos ensaios controle (amostras sem adição de CaCO_3). Para a AA, encontrou-se uma média aritmética de 32,70%, com desvio padrão de 1,12%. Para a SR, a média obtida foi de 3,90%, com desvio padrão de 0,43%. Os desvios são atribuídos à variabilidade intrínseca do processo de amostragem. Devido à acentuada variação granulométrica inicial do minério bruto e à heterogeneidade mineralógica natural da bauxita, pequenas oscilações na eficiência de homogeneização da pilha alongada podem resultar em alíquotas com concentrações mineralógicas sutilmente distintas, justificando a flutuação analítica detectada.

Figura 7 – Diagrama de caixa (*boxplot*) dos valores de AA e SR nos ensaios controle sem adição de CaCO_3 .



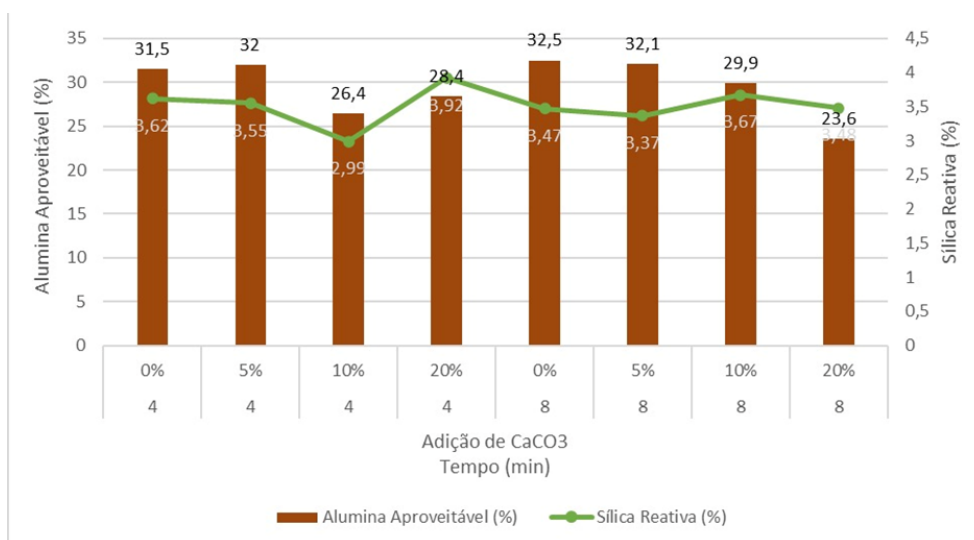
Fonte: Elaborada pelas autoras (2026).

2.4.2 Efeito do Esforço Mecânico: Moinho de Bolas vs. Barras

As Figuras 8 e 9 apresentam os resultados de variação de SR e AA com o tempo e com a porcentagem de adição de CaCO_3 para os moinhos de bolas e barras, respectivamente.

Para a moagem em bolas, observou-se uma redução do teor de SR para 2,99% com 10% de carbonato em 4 min, e para 3,48% com 20% de carbonato após 8 min. No entanto, esta redução na sílica reativa foi acompanhada por uma queda prejudicial no teor de AA, que reduziu para 26,40% e 23,60%, respectivamente.

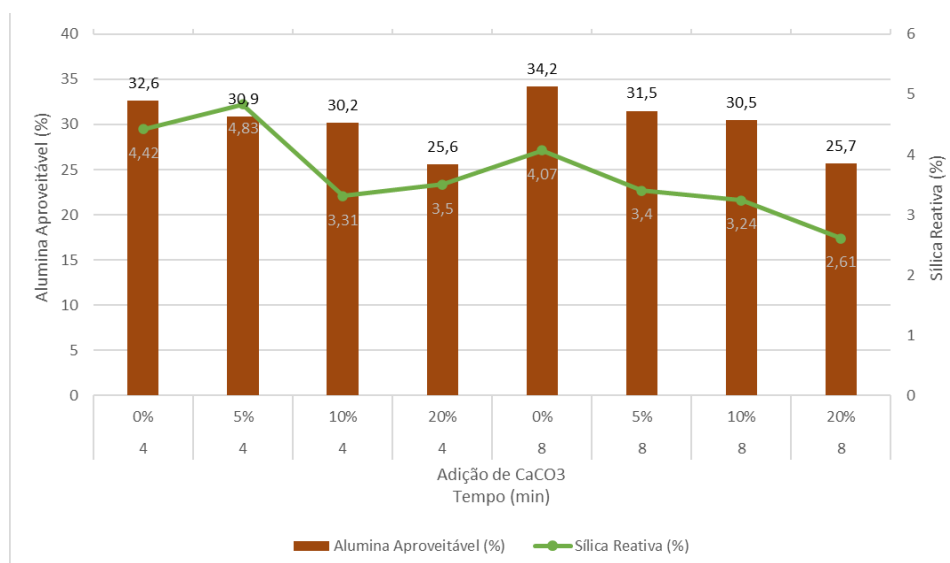
Figura 8 – Comparativo do teor de SR para o moinho de bolas em diferentes tempos de residência e porcentagens de CaCO_3 .



Fonte: Elaborada pelas autoras (2026).

Ao analisar os resultados no moinho de barras em 8 minutos de residência, constata-se que a dosagem de 5% de CaCO_3 mostra-se consideravelmente eficiente. Essa condição reduziu o teor de SR para 3,40%, um valor competitivo quando comparado à dosagem dobrada (10%), que alcançou 3,24%. A amostra referencial de 8 minutos registrou 34,20% de AA, enquanto a adição máxima de 20% do aditivo reduziu esse patamar para 25,70%.

Figura 9 – Comparativo do teor de SR para o moinho de barras em diferentes tempos de residência e porcentagens de CaCO_3 .



Fonte: Elaborada pelas autoras (2026).

Sob a ótica industrial, a formulação com 5% na moagem em barras torna-se a condição ótima, pois promove uma redução expressiva da impureza com apenas a metade do insumo exigido, minimizando simultaneamente a queda por diluição na AA. Além das variações nos teores de AA e SR, a observação visual durante a execução dos testes revelou a formação de aglomerados grosseiros de material no moinho de bolas. Em contrapartida, o moinho de barras entregou um material consideravelmente mais particulado e homogêneo.

Estes resultados estão de acordo com a distribuição granulométrica dos produtos de moagem do ensaio controle. Os dados detalhados das massas retidas em cada malha, incluindo a fração fina acumulada no fundo ($-45\ \mu\text{m}$), estão apresentados na Tabela 5, enquanto a curva de distribuição granulométrica está ilustrada na Figura 10.

Tabela 5 - Resultados da análise granulométrica (massas retidas em gramas).

Abertura da Peneira (μm)	Moagem com Barras (4 min)	Moagem com Barras (8 min)	Moagem com Bolas (4 min)	Moagem com Bolas (8 min)
212	15,48	3,98	24,83	15,68
150	12,43	2,97	4,03	1,98
106	14,26	9,87	6,76	5,72
75	10,79	13,63	8,29	9,64
63	7,40	12,28	6,25	8,07
45	6,51	9,32	6,61	12,16
Fundo (-45)	49,37	60,12	47,32	68,93
Massa Inicial	117,0	113,0	105,2	124,0
Massa Recuperada	116,21	112,17	104,09	122,18

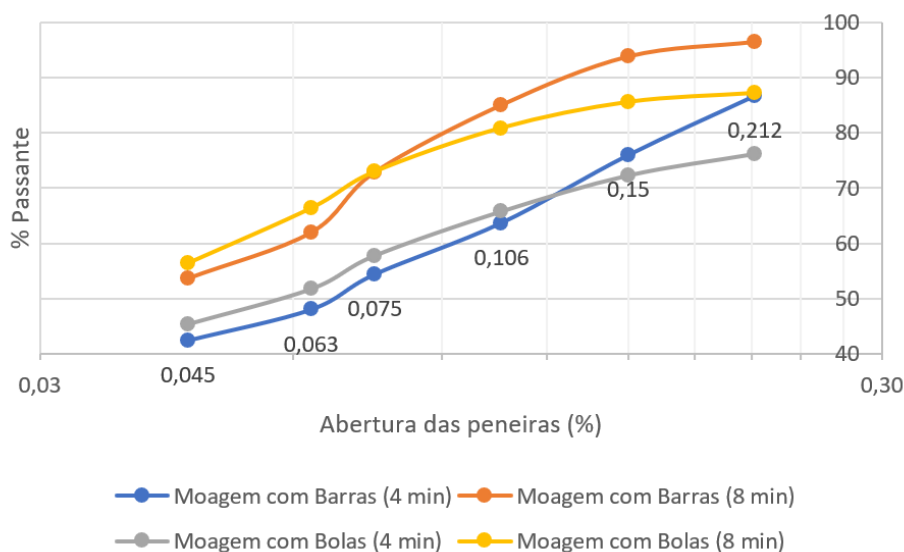
Fonte: Elaborada pelas autoras (2026).

A distribuição granulométrica evidencia que o aumento do tempo de moagem para 8 minutos resultou em uma maior fragmentação do minério, deslocando as curvas para cima. Esse comportamento era esperado e indica que o avanço no tempo de moagem gera partículas menores, fator que pode estar associado ao maior efeito de redução de SR observado nos tempos mais longos.

No entanto, no que diz respeito à comparação entre os corpos moedores, as diferenças foram muito sutis. Embora a moagem com barras tenha apresentado uma pequena vantagem na redução de partículas em malhas maiores, esse comportamento se inverteu nas frações mais finas. Uma parcela significativa do material acumulou-se no fundo (-45 μm), representando 42,46% e 53,60% da massa para a moagem em barras (nos tempos de 4 e 8 min, respectivamente) contra 45,46% e 56,42% para bolas (nos mesmos tempos). Isso demonstra que o moinho de bolas gerou uma quantidade de finos sensivelmente maior. Esse fenômeno é fundamentado pela literatura clássica de cominuição (CHAVES, 2012; LUZ et al., 2010; WILLS; FINCH, 2015), que explica que os corpos esféricos atuam por meio de contatos pontuais, favorecendo a supermoagem e a produção excessiva de ultrafinos, em contraste com a fratura por linha de contato exercida pelas barras.

Dessa forma, como há pouca diferença granulométrica global entre os equipamentos, conclui-se que o mero efeito físico de redução de tamanho de partícula não justifica as expressivas variações nos teores de AA e SR na comparação entre barras e bolas.

Figura 10 - Curva de Distribuição Granulométrica.



Fonte: Elaborada pelas autoras (2026).

O melhor desempenho da moagem em barras na redução da sílica reativa pode se justificar pelo fato de que a cinemática das barras forçou o contato contínuo e íntimo entre o carbonato e a sílica. Conforme estabelecido pela literatura clássica de cominuição (CHAVES, 2012; WILLS; FINCH, 2015), o moinho de barras oferece um mecanismo de fragmentação por linha de contato, o que distribui a energia mecânica de forma mais uniforme em polpas de alta densidade, reduzindo o amortecimento viscoso observado no sistema de esferas. Desse modo, enquanto em 4 minutos de moagem com baixas dosagens não se verificaram grandes alterações, o aumento do tempo para 8 minutos associado à dosagem máxima (20% de CaCO_3) promoveu uma redução de 35,87% no teor de SR.

A literatura corrobora esse comportamento: a moagem por barras é reconhecida por minimizar a supermoagem e o empastamento em polpas densas, uma vez que o mecanismo de fratura ocorre por linha de contato ao longo de toda a geratriz da barra, distribuindo o esforço de forma mais homogênea e com menor amortecimento viscoso do que o contato pontual gerado pelas esferas (LUZ et al., 2010).

De acordo com a literatura, a redução de SR ocorre porque a alta energia do processo mecanoquímico promove a quebra da estrutura da caulinita, induzindo sua reação com o cálcio do aditivo (ALEX et al., 2014). Essa interação conduz à transformação da caulinita em novas fases mineralógicas insolúveis, como as

hidrogranadas cálcicas (PAZ; ANGÉLICA; KAHN, 2017). Sendo estruturalmente estável durante a etapa de lixiviação básica com soda, essa nova fase inativa a sílica, impedindo que ela se dissolva e consuma os reagentes do licor (McCORMICK; PICARO; SMITH, 2002).

Apesar do êxito na inativação da SR no melhor cenário de moagem com barras, ocorreu um efeito colateral: o aumento na dosagem de CaCO_3 resultou na queda dos teores de AA (REIS et al., 2024). Esse comportamento antagônico entre a quantidade de aditivo e a preservação da alumina está ilustrado de forma expressiva na Figura 6.

A redução de AA observada para os dois tipos de corpos moedores justifica-se primariamente pelo efeito de diluição - ao se adicionar quantitativamente uma carga inerte (isenta de alumínio) como o CaCO_3 à polpa, o percentual de alumina por massa total de amostra diminui matematicamente. Além disso, este decréscimo também é explicado pela literatura sobre reações mecanoquímicas envolvendo aluminossilicatos. Segundo Reis et al. (2024), em ensaios de ativação de bauxita, o excesso do aditivo de cálcio promove reações concorrentes com a gibbsita. Nessas reações, forma-se a hidrogranada secundária katoíta ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$), que sequestra o alumínio em sua matriz cristalina insolúvel, reduzindo o índice de AA. Este *trade-off* ressalta a importância de encontrar a dosagem ideal aderente à escala industrial para que a inativação da SR não resulte em perdas inaceitáveis de alumina.

No entanto, para a investigação profunda sobre o mecanismo das reações mecanoquímicas é necessário se conduzir, em estudos futuros, o acompanhamento dos produtos com análises mineralógicas. O escopo deste projeto foi validar o potencial da moagem conduzida com adição de CaCO_3 na redução da SR da bauxita estudada.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou a viabilidade e o potencial da moagem a úmido com a adição de CaCO_3 proveniente de rejeito para a inativação da SR presente no minério de bauxita.

O tempo e o tipo de corpos moedores influenciaram o processo. O cenário de maior rendimento foi obtido utilizando o moinho de barras, associado a um tempo de 8 minutos e dosagem de 5% de CaCO_3 , o qual conferiu uma redução expressiva de aproximadamente 16,46% no teor inicial de SR. Em contrapartida, constatou-se que

o moinho de bolas se revelou ineficiente para as mesmas formulações da polpa. Houve também uma redução proporcional nos teores de AA com o aumento das dosagens do aditivo cálcico. Este panorama aponta que a aplicabilidade do método na planta industrial exigirá um ajuste fino para estabelecer o ponto de equilíbrio ótimo entre a redução da SR e a preservação da alumina.

O estudo mecanístico não foi objeto deste trabalho, portanto as razões das modificações observadas foram discutidas de acordo com trabalhos da literatura: (i) a redução de SR se deve a reações mecanoquímicas que induzem a transformação da caulinita em novas fases mineralógicas, como a katoíta (hidrogranada cálcica), que são insolúveis na digestão básica; (ii) a redução de AA pode ser associado ao efeito da diluição da amostra ou à provável formação de fases insolúveis secundárias, como a katoíta.

Adicionalmente, o estudo consolida uma importante contribuição para o desenvolvimento sustentável ao dar um direcionamento tecnológico a um rejeito industrial. A utilização do CaCO_3 residual, integrando-o ao ciclo de reaproveitamento de materiais, demonstra a viabilidade de associar a eficiência de processos minerais aos conceitos fundamentais de economia circular. Essa estratégia não apenas mitiga a geração de passivos ambientais, mas também abre perspectivas para rotas de beneficiamento mais limpas e integradas na indústria metalúrgica.

3.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos e das discussões levantadas nesta pesquisa, sugerem-se as seguintes abordagens para o aprofundamento e a continuidade do estudo da inativação da sílica reativa por vias mecanoquímicas:

- a) realizar análises mineralógicas detalhadas nos produtos moídos, para confirmar a amorfização da caulinita e a efetiva precipitação da fase hidrogranada;
- b) conduzir ensaios com tempos de moagem superiores a 8 minutos, a fim de investigar a cinética de longo prazo e verificar se os teores de alumina aproveitável e sílica reativa continuam em declínio ou se estabilizam em um ponto de equilíbrio;

- c) conduzir uma malha fina de testes com dosagens de CaCO_3 no moinho de barras, explorando concentrações intermediárias (entre 0% e 10%), visando identificar com exatidão o ponto ótimo de operação;
- d) submeter os produtos moídos ativados a ensaios de lixiviação em escala de bancada, com o objetivo de quantificar experimentalmente a real redução no consumo de hidróxido de sódio;
- e) avaliar o comportamento cinético e termodinâmico do minério em testes piloto de moagem contínua, verificando a viabilidade técnica e econômica desse pré-tratamento em escala industrial.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Anuário Mineral Brasileiro**. Brasília: ANM, 2025.

ALEX, T. C. et al. Surface and bulk chemistry of mechanochemically synthesized tohdite nanoparticles. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 118, n. 47, p. 27435-27444, 2014.

ALQUINO, T. F. **Beneficiamento químico da bauxita de Santa Catarina**,. Diss. Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, SC (2007) 125.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15944: Minérios de alumínio - Determinação de alumina aproveitável e de sílica reativa**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BALÁŽ, P. **Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering**. Berlin: Springer, 2008.

CAMILO, K. N. **Reaproveitamento de resíduos de rochas e mineração na construção civil em prol da economia circular**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Procedimento Operacional: Análises Químicas de Bauxita**. Código: PO-CBA-AL-ZM-LAB-0035, Revisão 6. Miraf, MG: CBA, 11 abr. 2025a. Documento interno não publicado.

COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Procedimento Operacional: Análise de Metais**. Código: PO-CBA-AL-ZM-LAB-0022, Revisão 8. Miraf, MG: CBA, 18 jul. 2025b. Documento interno não publicado.

CONSTANTINO, K. Araki, D. O. Silva, W. Oliveira. **Química Nova**, v. 25, n. 3 p. 490, 2002.

DUARTE, G. M. P. et al. Beneficiamento da Bauxita na Zona da Mata Mineira. **Revista da Escola de Minas**, v. 76, n. 2, 2023.

FRANCO, R. G. F.; LANGE, L. C. Estimativa do fluxo dos resíduos no Brasil: uma abordagem para a sustentabilidade. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 73-82, 2011.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11-32, 2016.

GOW, N. N.; LOZEJ, G. P. Bauxite. **Geoscience Canada**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 9-16,

1993. Disponível em:

<https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/download/3785/4299>. Acesso em: 12 jun. 2026.

HABASHI, F. **A Textbook of Hydrometallurgy**. 2. ed. Québec: Metallurgie Extractive Quebec, 1993.

HEINICKE, G. **Tribochemistry**. Berlin: Akademie-Verlag, 1984.

HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K.; GROCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 146, n. 1-3, p. 359-374, 1999.

IUPAC. Glossary of terms used in mechanochemistry (IUPAC Recommendations 2004). *Pure and Applied Chemistry*, v. 76, n. 6, p. 1139-1149, 2004.

KIRK-OTHMER. **Encyclopedia of Chemical Technology**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1992.

KLAUBER, C.; GRÄFE, M.; TSCHIRNER, C. Bauxite residue issues: II. options for residue utilization. **Hydrometallurgy**, v. 108, n. 1-2, p. 11-32, 2011.

KUMAR, S.; KUMAR, R.; BANDOPADHYAY, A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 48, n. 4, p. 301-314, 2006.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MASSOLA, C. P. **Flotação reversa da bauxita de Mirai, MG**. 2008. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MCCORMICK, P. G.; PICARO, T.; SMITH, P. A. I. Mechanochemical treatment of high silica bauxite with lime. **Minerals Engineering**, v. 15, n. 3, p. 211-214, 2002.

PAZ, S. P. A.; ANGÉLICA, R. S.; KAHN, H. Optimization of the reactive silica quantification method applied to Paragominas-type gibbsitic bauxites. **International Journal of Mineral Processing**, v. 162, p. 48-57, 2017.

PRADO, P. F. et al. Bauxita no Brasil e suas aplicações. **Geociências**, v. 31, n. 4, 2012.

REIS, A. S.; MELO, C. C. A.; DUARTE, G. M. P.; RAMOS, J.; ARAÚJO, J. E. N. Kaolinite Reduction on Bauxite through Mechanochemical Activation with Lime. **TRAVAUX 53, Proceedings of the 42nd International ICSOBA Conference**, Lyon, p. 229-234, 2024.

SANTOS, R. **Estudo do Tratamento Mecanoquímico da Bauxita do Nordeste do Pará**. Pará. XVI Jornada de Iniciação Científica – CETEM, 2013.

SILVA, F. A. N., BARBATO, C. N., SANTOS, R. D., ALMEIDA, D. S.G., SAMPAIO, J. A., **MECHANOCHEMICAL ACTIVATION OF BAUXITE**. Rio de Janeiro, Brasil. 2012.

SMITH, P. The processing of high silica bauxites – review of existing and potential processes. **Hydrometallurgy**, v. 98, n. 1-2, p. 162-176, 2009.

SUN, W. et al. Mechanochemistry in Mineral Processing. **Minerals**, v. 13, n. 5, 2023.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.

VAN DEURSEN, C. M. **Métodos de desagüamento e disposição de rejeito da bauxita: estudo de caso e avaliação econômica**. 2016.

VICK, S. G. **Planning, design, and analysis of tailings dams**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.