

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E TECNOLÓGICA DE BAUXITA PROVENIENTE DO COMPLEXO ALCALINO DE POÇOS DE CALDAS (MG)

MINERALOGICAL AND TECHNOLOGICAL CHARACTERIZATION OF BAUXITE FROM THE POÇOS DE CALDAS ALKALINE COMPLEX (MG)

Mariana Gonçalves do Espírito Santo

Aluna de Graduação da Engenharia de Alimentos 6º período

Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: agosto de 2025

mariges1208@gmail.com

Antonieta Middea

Orientadora, Engenheira Química, D.Sc.

amiddea@cetem.gov.br

Ruan Roberto Henriques

Coorientador, Químico, D.Sc.

rhenriques@cetem.gov.br

RESUMO

Este trabalho realizou a caracterização tecnológica de uma amostra de bauxita proveniente do Complexo Alcalino de Poços de Caldas (MG) por FRX, DRX, em oito frações granulométricas e MEV/EDS e Potencial Zeta na fração -25+9,5 mm. A amostra global apresentou teores de 43,1% de Al_2O_3 e 14,9% de SiO_2 . O Al_2O_3 aproveitável apresentou os maiores teores nas frações mais grossas, atingindo 46,3% (com relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ de 17,4). Por outro lado, a sílica (SiO_2) reativa acumulou-se na fração fina, alcançando 9,97% de teor e concentrando cerca de 69% da distribuição total de SiO_2 . As análises de DRX e MEV/EDS confirmaram a gibbsita como fase aluminosa dominante, evidenciando o enriquecimento de quartzo livre nas frações intermediárias (com teores de até 20%) e de caolinita na fração fina (74%). O comportamento eletrocinético revelou ponto isoelétrico (PIE) em pH 5,8, refletindo a contribuição de superfícies oxidadas de alumínio e ferro. Os resultados demonstram que a bauxita é propensa ao descarte seletivo da fração fina para remoção de sílica reativa antes do processo Bayer.

Palavras chave: Bauxita, sílica reativa, alumina aproveitável.

ABSTRACT

This study performed the technological characterization of a bauxite sample from the Poços de Caldas Alkaline Complex (MG) using XRF and XRD across eight size fractions, as well as SEM/EDS and Zeta Potential analysis on the -25+9.5 mm fraction. The global sample presented contents of 43.1% Al_2O_3 and 14.9% SiO_2 . Available Al_2O_3 showed the highest contents in the coarser fractions, reaching 46.3% (with an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ratio of 17.4). On the other hand, reactive silica (SiO_2) accumulated in the fine fraction, reaching a content of 9.97% and accounting for approximately 69% of the total SiO_2 distribution. XRD and SEM/EDS analyses confirmed gibbsite as the dominant aluminous phase, highlighting the enrichment of free quartz in the intermediate fractions (with contents up to 20%) and kaolinite in the fine fraction (74%). Electrokinetic behavior revealed an isoelectric point (IEP) at pH between 5.8 and 6.0, reflecting the contribution of oxidized aluminum and iron surfaces. The results demonstrate that the bauxite is suitable for selective rejection of the fine fraction to remove reactive silica prior to the Bayer process..

Keywords: Bauxite, reactive silica, available alumina.

1. INTRODUÇÃO

A bauxita, matéria-prima para a produção de alumínio, requer elevados teores de Al_2O_3 aproveitável e baixa sílica reativa para a viabilidade do processo Bayer [1, 2]. O principal desafio técnico decorre de argilominerais como a caolinita, cuja reação com a soda cáustica eleva os custos operacionais e a geração de lama vermelha, ao passo que o quartzo livre apresenta menor reatividade na digestão. Mapear a distribuição e a associação dessas fases silicatadas ao longo da granulometria é, portanto, essencial para fundamentar estratégias de separação física e descarte seletivo de contaminantes.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo específico realizar a caracterização tecnológica e mineralógica de uma amostra de bauxita do Complexo Alcalino de Poços de Caldas (MG), determinando a distribuição das fases minerais e dos teores de alumina e sílica em oito frações granulométricas, além de avaliar o comportamento eletrocinético da amostra na fração -25+9,5 mm, visando subsidiar estratégias de beneficiamento físico.

3. METODOLOGIA

A amostra de bauxita foi homogeneizada, quarteada e classificada por peneiramento a úmido nas frações +25, -25+9,5, -9,5+4,75, -4,75+1,18, -1,18+0,3, -0,3+0,106, -0,106+0,038 e -0,038 mm. A composição química foi determinada por WDXRF (PANalytical Axios Max; pastilhas fundidas em $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7/\text{LiBO}_2$ 1:10 a 1.100 °C). Teores de alumina aproveitável e sílica reativa foram analisados por digestão alcalina em autoclave em laboratório externo. A mineralogia foi avaliada por DRX pelo método do pó (Bruker D4 Endeavor, $\text{Co K}\alpha$, 35 kV/40 mA, 5-80° 2 θ , passo 0,02°/1 s), com identificação na base PDF02 (ICDD, 2006) e quantificação por refinamento *Rietveld*. Análises microtexturais foram realizadas por MEV/EDS (FEI Quanta 400/Bruker Esprit 2.5, detector BSE, 20 kV) em amostras recobertas com paládio (Leica EM ACE 200, 180 s). O potencial zeta da amostra na fração -25+9,5 mm foi medido em Malvern Zetasizer em função do pH (eletrólito suporte: KCl 0,01 M; ajustes com KOH e HCl).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição de Al_2O_3 superou a de SiO_2 nas frações de +25 mm a -0,106+0,038 mm (5% a 12% contra < 7%) (Figura 1). Ocorre, contudo, um acúmulo acentuado na fração fina (-0,038 mm), que concentra 69% de toda a SiO_2 e 46% do Al_2O_3 da amostra. Essa retenção preferencial da sílica nos finos ratifica a eficiência do descarte seletivo da fração passante em 0,038 mm para reduzir a carga de contaminantes antes do processo Bayer.

A caracterização por DRX confirma a gibbsita (G) como fase aluminosa dominante, acompanhada por caolinita (C) e quartzo livre (Q) como ganga silicatada (Figura 2). O refinamento *Rietveld* revela uma distribuição mineralógica seletiva: as frações intermediárias (-4,75 a +0,106 mm) enriquecem-se em quartzo (15% a 20%), mantendo a caolinita abaixo de 6%, enquanto a fração fina (-0,038 mm) concentra 74% de toda a caolinita da amostra, além de 45% da gibbsita e 14% do quartzo. Essa partição explica o comportamento químico observado, demonstrando que a sílica reativa (caolinita) acumula-se nos finos, enquanto a sílica menos reativa (quartzo) predomina em tamanhos intermediários, fundamentando o descarte da fração passante em 0,038 mm.

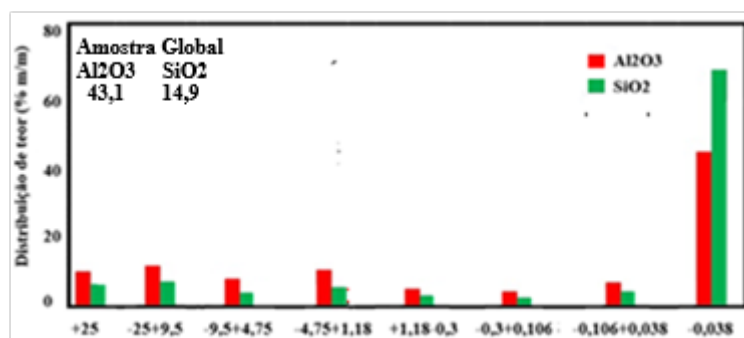


Figura 1: Distribuição de teor (% m/m) de Al₂O₃ e SiO₂ nas frações granulométricas (mm) da amostra de bauxita.

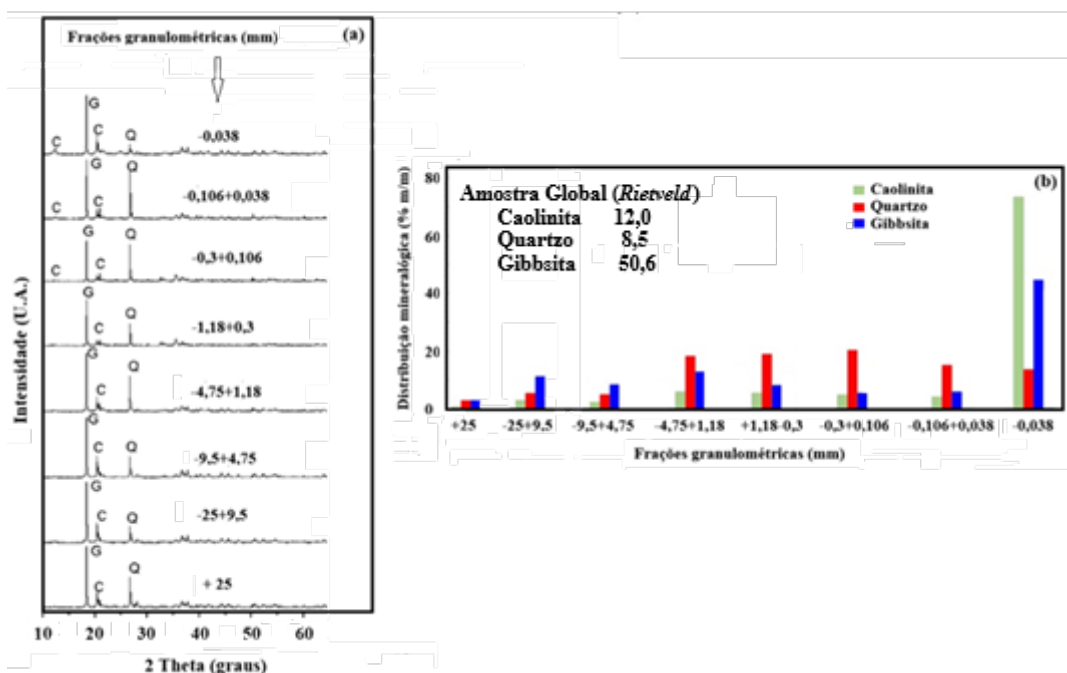


Figura 2: Análise mineralógica qualitativa e quantitativa da amostra de bauxita por faixa granulométrica: (a) Difratomogramas de raios X evidenciando os principais picos das fases identificadas (G: gibbsita; C: caolinita; Q: quartzo) e (b) teor das fases minerais (% m/m) determinado via refinamento *Rietveld*.

A Tabela 1 apresenta a variação da alumina aproveitável e da sílica reativa em função da distribuição granulométrica da bauxita. Observa-se que as frações mais grossas concentram os maiores teores de Al₂O₃ aproveitável, com destaque para as faixas de -25+9,5 mm e -9,5+4,75 mm, que alcançaram 45,5% e 46,3%, proporcionando as mais elevadas relações Al₂O₃/SiO₂ (18,6 e 17,4, respectivamente). Nas frações intermediárias (-4,75 a +0,038 mm), verifica-se um decréscimo nos teores de alumina aproveitável (22,5% a 28,8%), decorrente da diluição provocada pela presença de quartzo livre identificada por DRX. Por sua vez, a fração fina (-0,038 mm) apresenta uma concentração maior de SiO₂ reativa, cujo teor atinge 9,9%, cerca de três vezes superior à média das frações anteriores, reduzindo a relação Al₂O₃/SiO₂ para 3,5, embora ainda apresente seu teor de alumina aproveitável (35,4%). Esses dados confirmam que a fração passante em 0,038 mm compromete a qualidade industrial do minério e reforçam a eficácia do seu descarte seletivo antes da etapa de digestão alcalina (Processo Bayer).

Tabela 1: Teores de Al_2O_3 aproveitável, SiO_2 reativa e relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ nas frações granulométricas da amostra de bauxita.

Fração granulométrica (mm)	Teor (% m/m)		
	Al_2O_3	SiO_2	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$
+25	38,9	2,7	14,4
-25+9,5	45,5	2,5	18,6
-9,5+4,75	46,3	2,7	17,4
-4,75+1,18	28,0	2,7	10,4
-1,18+0,3	24,4	3,7	6,6
-0,3+0,106	22,5	3,8	5,9
-0,106+0,038	28,8	3,3	8,8
-0,038	35,4	9,9	3,5
Global	33,2	6,1	5,4

A imagem de BSE revela uma matriz porosa constituída por agregados finos (Figura 3). A microanálise por EDS confirma o predomínio de O (52,7%) e Al (29,7%), condizente com a matriz gibbsítica majoritária, além de Fe (12,0%) e Si (5,6%) associados à ganga. O mapeamento elementar evidencia a interdispersão entre Al, Si e Fe, indicando que os minerais silicatados e ferrosos encontram-se finamente associados à matriz aluminosa, o que reforça a importância do controle granulométrico para a liberação dessas fases contaminantes.

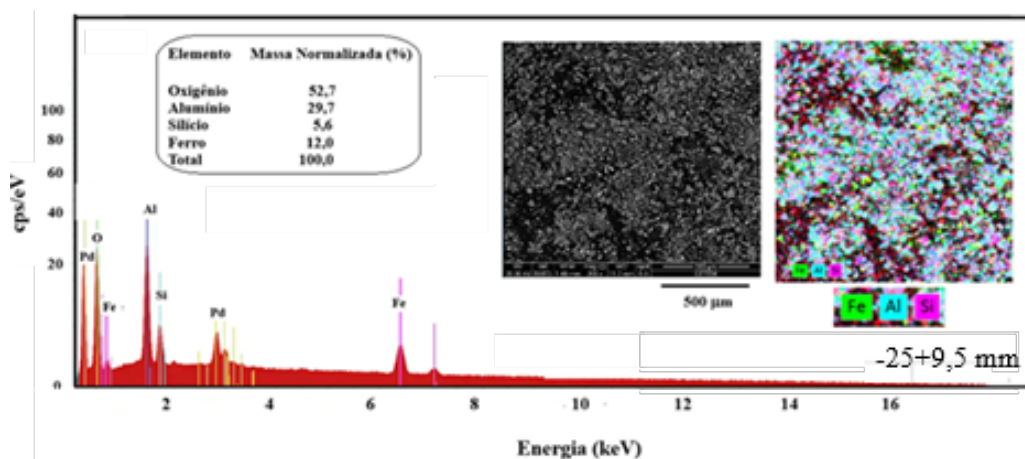


Figura 3: Caracterização microtextural e microanalítica por MEV/EDS da amostra de bauxita: imagem de elétrons retroespalhados (BSE), espectro de EDS com composição elementar semiquantitativa (% em massa) e mapa de distribuição dos elementos Fe (verde), Al (ciano) e Si (magenta).

O comportamento eletrocinético das partículas finas da bauxita em função do pH é apresentado na Figura 4. As curvas exibem o perfil característico de superfícies oxidadas e hidroxiladas, variando de valores positivos entre +31 mV e +34 mV em pH 2 até atingir valores aniônicos de -32 mV a -38 mV em pH 12. O ponto isoelétrico (PIE) localizou-se em pH 5,8, refletindo o comportamento eletrostático global de uma matriz que apresenta diferentes fases minerais na amostra [3]. Como a gibbsita isolada possui PIE em faixa mais básica (pH 7,0–9,0) e as fases silicatadas, como o quartzo e a caulinita, exibem superfícies predominantemente eletronegativas na quase totalidade da escala de pH (PIE < 3,0), o valor de 5,8 traduz o equilíbrio interfacial da mistura de fases presentes. O conhecimento desse comportamento eletrocinético é fundamental para controlar o estado de dispersão ou agregação coloidal da polpa, fornecendo subsídios diretos para a otimização de etapas de deslamagem, dessilicação prévia (por atrição, rotas mecanoquímicas, etc.).

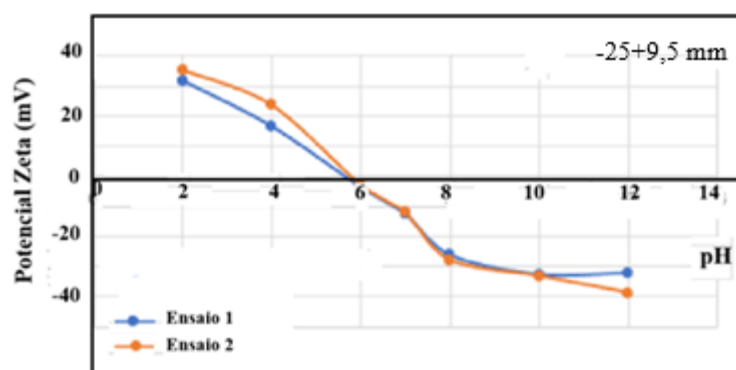


Figura 4: Potencial zeta em função do pH para a amostra de bauxita.

5. CONCLUSÕES

A caracterização integrada da amostra de bauxita indica que a gibbsita constitui a principal fase aluminosa, estando associada à caolinita e ao quartzo livre como minerais de ganga. Verificou-se uma variação na distribuição das fases em função da granulometria: enquanto as frações intermediárias (-4,75 a +0,106 mm) concentram o quartzo livre, a fração fina (-0,038 mm) retém 74% da caolinita presente no minério. Em razão desse acúmulo de sílica reativa (9,9%), a relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ na fração passante em 0,038 mm reduz-se para 3,5, enquanto as frações mais grossas (-25 a +4,75 mm) apresentam relações de 17,4 a 18,6. O comportamento eletrocinético apresentou ponto isoelétrico em pH 5,8, resultante do equilíbrio de cargas da mistura de fases minerais presentes na amostra.

Diante desses resultados, a separação e o descarte da fração passante em 0,038 mm constituem uma etapa viável para a remoção da maior parcela da sílica reativa previamente ao processo de digestão alcalina (Processo Bayer).

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pela bolsa de iniciação científica, para a viabilização deste projeto. Minha gratidão aos meus orientadores, Antonieta Middea e Ruan Roberto Henriques, e, em especial, à Dra. Marisa Monte, pela orientação, disponibilidade e valiosos ensinamentos ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço também aos colegas de trabalho pelo apoio e pela parceria constantes durante todo o processo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGÉLICA, R. S.; KAHN, H.; PAZ, S. P. A. A proposal for bauxite quality control using the combined Rietveld - Le Bail - Internal Standard PXRD method – Part 2: Application to a gibbsitic bauxite from the Paragominas region, northern Brazil. *Minerals Engineering*, v.122, p.148-155, 2018.

HUNTER, R. J. *Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications*. London: Academic Press, 1981.

PAZ, S. P. A.; KAHN, H.; ANGÉLICA, R. S. A proposal for bauxite quality control using the combined Rietveld – Le Bail – Internal Standard PXRD Method – Part 1: hkl model developed for kaolinite. *Minerals Engineering*, v.118, p.52-61, 2018.