

2ª Edição revisada e ampliada

EDITORES: ADÃO BENVINDO DA LUZ & FERNANDO A. FREITAS LINS

ROCHAS & MINERAIS INDUSTRIAIS

usos e especificações



SUMÁRIO

PARTE I: INTRODUÇÃO GERAL

01. PANORAMA DAS ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS NO BRASIL 3
Fernando A. Freitas Lins

02. DESEMPENHO FUNCIONAL DOS MINERAIS INDUSTRIAIS: 25
DESAFIOS TECNOLÓGICOS, FERRAMENTA DE MARKETING E ESTRATÉGIA DE VALORIZAÇÃO
Renato R. Ciminelli

PARTE II: ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS: USOS E ESPECIFICAÇÕES

03. AGALMATOLITO 69
Adão Benvindo da Luz, Paulo Tomedi e Rodrigo Martins

04. AMIANTO 79
*Normando Claudino Moreira de Queiroga, William Bretas Linares, Joselito Dasio da Silva
e Adão Benvindo da Luz*

05. AREIA INDUSTRIAL 103
Adão Benvindo da Luz e Fernando A. Freitas Lins

06. AGROMINERAIS - ENXOFRE 125
*Gildo de Araújo Sá C. de Albuquerque (in memoriam), Ronaldo Simões L. Azambuja (in memoriam.)
e Fernando A. Freitas Lins*

07. AGROMINERAIS - FOSFATO 141
Francisco E. Lápido Loureiro, Marisa Bezerra de Mello Monte e Marisa Nascimento

08. AGROMINERAIS - POTÁSSIO 175
Marisa Nascimento, Marisa Bezerra de Mello Monte e Francisco E. Lápido Loureiro

09. AGROMINERAIS - ROCHAS SILICÁTICAS COMO FONTES MINERAIS 205
ALTERNATIVAS DE POTÁSSIO PARA A AGRICULTURA
*Éder de Souza Martins, Claudinei Gouveia de Oliveira, Álvaro Vilela de Resende e Marcello
Silvino Ferreira de Matos*

10. ARGILA - ATAPULGITA E SEPIOLITA 223
Adão Benvindo da Luz e Salvador Luiz M. de Almeida

11. ARGILA - BENTONITA 239
Adão Benvindo da Luz e Cristiano Honório de Oliveira

12. ARGILA - CAULIM	255
<i>Adão Benvindo da Luz, Antônio Rodrigues de Campos, Eduardo Augusto de Carvalho, Luis Carlos Bertolino e Rosa Bernstein Scorzelli</i>	
13. BARITA	295
<i>Adão Benvindo da Luz e Carlos Adolpho Magalhães Baltar</i>	
14. BAUXITA	311
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Achilles Junqueira Bourdot Dutra</i>	
15. BERILO	339
<i>Marcelo Soares Bezerra e Júlio de Rezende Nesi</i>	
16. CALCÁRIO E DOLOMITO	363
<i>João Alves Sampaio e Salvador Luiz Matos de Almeida</i>	
17. CIANITA REFRATÁRIA	389
<i>Caroline Meira Lopes de Castro Joffily e Claudinei Gouveia de Oliveira</i>	
18. CROMITA	403
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Paulo Renato Perdigão Paiva</i>	
19. DIAMANTE	427
<i>Mario Jorge Costa e Adão Benvindo da Luz</i>	
20. DIATOMITA	451
<i>Silvia Cristina Alves França, Adão Benvindo da Luz e Paulo Francisco Inforçati</i>	
21. FELDSPATO	467
<i>Adão Benvindo da Luz, Fernando A. Freitas Lins e José Mario Coelho</i>	
22. FLUORITA	487
<i>João Alves Sampaio, Carlos Adolpho Magalhães Baltar e Mônica Calixto de Andrade</i>	
23. GIPSITA	505
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, Flavia de Freitas Bastos e Adão Benvindo da Luz</i>	
24. GRAFITA	527
<i>João Alves Sampaio, Paulo Fernando Almeida Braga e Achilles Junqueira Bourdot Dutra</i>	
25. HALITA	551
<i>Paulo Roberto Cabral de Melo, Renato Senna de Carvalho e Dorival de Carvalho Pinto</i>	

26. LÍTIÓ	585
<i>Paulo Fernando Almeida Braga e João Alves Sampaio</i>	
27. MAGNESITA	605
<i>Luís Rodrigues Armôa Garcia, Paulo Roberto Gomes Brandão e Rosa Malena Fernandes Lima</i>	
28. MANGANÊS	633
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade, Achilles Junqueira Bourdot Dutra e Márcio Torres Moreira Penna</i>	
29. MICA	649
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, João Alves Sampaio e Patrícia Maria Tenório Cavalcante</i>	
30. NEFELINA SIENITO	663
<i>João Alves Sampaio, Sílvia Cristina Alves França e Paulo Fernando Almeida Braga</i>	
31. QUARTZO	681
<i>Pedro Luiz Guzzo</i>	
32. RMIS: ROCHAS E MINERAIS PARA CERÂMICA DE REVESTIMENTO	723
<i>Mônica Calixto de Andrade, João Alves Sampaio, Adão Benvindo da Luz e Alberto Buoso</i>	
33. RMIS: ARGILA PARA CERÂMICA VERMELHA	747
<i>Marsis Cabral Junior, José Francisco Marciano Motta, Amilton dos Santos Almeida e Luiz Carlos Tanno</i>	
34. RMIS: ARGILA PLÁSTICA PARA CERÂMICA BRANCA	771
<i>José Francisco Mariano Motta, Adão Benvindo da Luz, Carlos Adolpho Magalhães Baltar, Marcelo Soares Bezerra, Marsis Cabral Júnior e José Mario Coelho</i>	
35. TALCO	793
<i>Ivan Falcão Pontes e Salvador Luiz Matos de Almeida</i>	
36. TERRAS-RARAS	817
<i>Simon Rosental</i>	
37. TITÂNIO: MINERAIS DE TITÂNIO	841
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Dorival de Carvalho Pinto</i>	
38. VERMICULITA	865
<i>José Fernandes de Oliveira Ugarte, João Alves Sampaio e Sílvia Cristina Alves França</i>	
39. ZEOLITAS NATURAIS	889
<i>Nélio das Graças de Andrade da Mata Resende, Marisa Bezerra de Mello Monte e Paulo Renato Perdigão Paiva</i>	
40. ZIRCONITA	917
<i>Luiz Carlos Bertolino, Nely Palermo, João Alves Sampaio e Sílvia Cristina Alves França</i>	

PARTE III: OS MINERAIS E O MEIO AMBIENTE

41. MINERAIS APLICADOS À TECNOLOGIA AMBIENTAL: MINERAIS VERDES 933
Silvia Cristina Alves França, José Fernandes de Oliveira Ugarte e Adriana de A. Soeiro da Silva
42. EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL E AMBIENTAL A POEIRAS DE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS 961
Zuleica Carmen Castilhos, Reiner Neumann e Olívia Bezerra

GLOSSÁRIO

CAPÍTULO 14

Bauxita

João Alves Sampaio¹
Mônica Calixto de Andrade²
Achilles Junqueira Bourdot Dutra³

1. INTRODUÇÃO

A bauxita foi descoberta em 1821 por Berthier, na localidade de Les Baux, no sul da França. Trata-se de uma rocha de coloração avermelhada, rica em alumínio, com mais de 40% de alumina (Al_2O_3). A proporção dos óxidos de ferro determina a coloração da rocha. Assim, a bauxita branca contém de 2 a 4% de óxidos de ferro, ao passo que, na bauxita vermelha, essa proporção atinge 25%. A bauxita é a fonte natural do alumínio, o terceiro elemento em abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e do silício. Mesmo com sua elevada abundância, não há notícias acerca da ocorrência de alumínio metálico na natureza. Constata-se sua maior ocorrência na forma combinada com outros elementos, principalmente, o oxigênio, com o qual forma alumina.

A rocha bauxita compõe-se de uma mistura impura de minerais de alumínio, e os mais importantes são gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$, diásporo $\text{AlO}(\text{OH})$ e boehmita $\text{AlO}(\text{OH})$. Esses minerais são conhecidos como oxi-hidróxidos de alumínio e suas proporções na rocha variam muito entre os depósitos, bem como o tipo e a quantidade das impurezas do minério, tais como: óxidos de ferro, argila, sílica, dióxido de titânio, entre outras. A maioria das bauxitas economicamente aproveitáveis possuem um conteúdo de alumina (Al_2O_3) entre 50 e 55%, e o teor mínimo para que ela seja aproveitável é da ordem de 30% (Anjos e Silva, 1983; Pagin *et al.*, 1983).

É importante enfatizar que, na segunda metade do século XIX, quase toda a bauxita era produzida na França e empregada, basicamente, para fins não metalúrgicos. Naquela época, a produção de alumina destinava-se principalmente ao uso como mordente na indústria têxtil. No entanto, com o desenvolvimento do processo Hall-Héroult (1886), a alumina disponível foi, de modo crescente, usada

¹Engº de Minas/UFPE, D.Sc. em Engenharia Metalúrgica/COPPE-UFRJ, Tecnologista Sênior do CETEM/MCT.

²Engª Química/UFRJ, D.Sc. em Engenharia Metalúrgica/COPPE-UFRJ, Professora do IPRJ/UERJ.

³Engº Metalúrgico/PUC-Rio, D.Sc. em Engenharia Metalúrgica/COPPE-UFRJ, Professor da COPPE/UFRJ.

na produção de alumínio metálico. Mesmo assim, foi desenvolvido um grupo de aplicações para a bauxita não-metalúrgica, no qual incluem-se: abrasivos, refratários, produtos químicos, cimentos de alta alumina, próteses humanas etc. Tornou-se evidente que matérias-primas com alta alumina e baixo teor de álcalis têm vantagens especiais, restando, apenas, solucionar a questão do custo-benefício.

A reserva mundial de bauxita é da ordem de 33,4 bilhões de toneladas. O Brasil responde por 3,5 bilhões de toneladas destas reservas, das quais 95% é bauxita metalúrgica. A produção mundial de bauxita, em 2006, foi de 177.775.000 t, cerca de 3,7% superior à produção de 2005. Cerca de 95% da produção é utilizada na obtenção do alumínio metálico, pelo processo Bayer, seguido do processo Hall-Héroult.

O Brasil produziu 22 milhões de toneladas em 2006 e se consolidou como o segundo produtor mundial do minério de alumínio, respondendo por 12,4% da produção mundial. No caso do metal, a produção mundial atingiu 33,1 milhões de toneladas de alumínio. Não obstante a percentagem relativamente pequena (5%) da bauxita não-metalúrgica, constitui ainda uma quantidade significativa, que, após calcinação, é aplicada na manufatura de abrasivos, refratários, cimento, entre outros. A alumina para obtenção de produtos químicos não passa pelo processo de calcinação.

Cerca de 34,5% da bauxita produzida no mundo provém da Austrália, destacando-se, ainda, como principais produtores, em termos percentuais: Brasil 12,4%; China 11,3; Guiné 8,6; Jamaica 8,4; Índia 7,3; Rússia 4,1; Venezuela 3,4.

Até o início do século, a China dominava o mercado de bauxita refratária, atendendo cerca de 70% da demanda mundial. Hoje, com o aumento da demanda interna, a produção chinesa destina-se ao consumo do próprio país.

2. MINERALOGIA E GEOLOGIA

Mineralogia

Embora os depósitos da rocha bauxita contenham uma diversidade de minerais, a maior parte das bauxitas não-metalúrgicas compõe-se de minerais de alumínio, basicamente, dos chamados oxi-hidróxidos de alumínio. Sob esse aspecto, algumas bauxitas refratárias consistem de gibbsita, com menor quantidade de caulinita. A gibbsita, a boehmita e o diásporo são os minerais mais

importantes contidos nas bauxitas, cujas principais impurezas são: caulinita, quartzo, hematita, goethita, rutilo e anatásio. A diferença principal entre bohemita e diásporo, em relação à gibbsita, está na estrutura cristalina. A gibbsita existe na forma cristalina e os outros, na forma de monohidrato. Na Tabela 1 constam os três principais minerais de bauxita e suas características, além das composições químicas da bauxita não-metalúrgica e da bauxita metalúrgica. Observa-se que a diferença mais relevante entre esses dois tipos de bauxita é o teor de Fe_2O_3 . Como princípio, considera-se que a bauxita refratária deve ter mais alumina e menos impurezas.

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

Minerais de alumínio contidos nas bauxitas			
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
(%) máxima de alumínio	65,4	85,0	85,0
Sistema cristalino	Monoclínico	Ortorrômbico	Ortorrômbico
Dureza Moh	2,5-3,5	3,5-4,0	6,5-7,0
Densidade	2,42	3,01	3,44
Índice de refração	1,568	1,649	1,702
Temperatura (°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 (g $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{L}$) (*)	128	54	Insolúvel
(*) Em solução de Na_2O a 100 g/L, a 125 °C.			
Bauxita Não-Metalúrgica		Bauxita Metalúrgica	
Constituintes	(%)	Constituintes	(%)
Fe_2O_3	2,5 (máx.)	Fe_2O_3	11 - 12
SiO_2	5 - 7	SiO_2	< 4,0
Al_2O_3	50	Al_2O_3^*	> 48
Densidade aparente > 3		*Alumina aproveitável pelo processo Bayer	

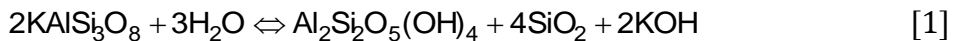
Fonte: Habashi, 1993.

A condição essencial à formação da bauxita é a existência de um clima tropical (uma temperatura média anual acima de 20°C), alternando as estações seca e úmida, que favorecem o processo natural de lixiviação. Dessa forma, silicatos e argilominerais são decompostos, há remoção da maior parte da sílica, enquanto os óxidos de alumínio e ferro são concentrados. Desse modo, obtém-se maior taxa de formação de bauxita quando ocorre:

- (i) elevada porosidade na rocha;
- (ii) uma cobertura vegetal com adequada atividade bacteriológica;
- (iii) topografia plana ou, pelo menos, pouco acidentada que permita o mínimo de erosão;
- (iv) longo período de estabilidade e intensa alteração das condições climáticas, principalmente, as estações seca e úmida.

Feldspato plagioclásio é o principal mineral que, facilmente, dá origem à bauxita. Os processos que realizam a conversão de minerais silicatados de alumínio constituintes da rocha estão descritos a seguir.

Caulinização - É o processo natural de formação do caulim, o qual consiste na alteração de rochas, *in situ*, característico de regiões de clima tropical (quente e úmido), cujas condições físico-químicas favorecem a decomposição de feldspatos ($KAlSi_3O_8$) e de outros aluminossilicatos contidos em granitos e rochas metamórficas. Argilas e folhelhos podem também sofrer alteração para uma mistura constituída de caulinita [$Al_2Si_2O_5(OH)_4$] e quartzo. O que ocorre é uma hidratação de um silicato de alumínio, seguido de remoção de álcalis, conforme a reação:



Em resumo, o processo baseia-se na transição da rocha, consistindo essencialmente de silicatos de alumínio (especialmente feldspato), para formar minerais de caulinita, como resultado do intemperismo ou alteração hidrotermal (Luz, 1998).

Laterização - O termo laterita é empregado para solos cujos componentes principais são os hidróxidos de alumínio e de ferro, onde as águas pluviais removeram a sílica e diversos cátions. Como a rocha é rica em alumina, a laterita que dela provier terá o nome de bauxita, o principal minério de alumínio. A lateritização baseia-se, fundamentalmente, num processo de diagênese resultando no aumento do caráter eletropositivo dos colóides do solo. Quando o processo se completa, tem-se a transformação dos solos em rocha, o laterito.

Bauxitização - Processo de formação da bauxita dessilicatada e, freqüentemente, na presença de calcário. Esse processo caracteriza-se pela predominância de óxido hidratado de alumínio associado ao óxido de ferro, sílica remanescente e outras impurezas.

3. LAVRA E PROCESSAMENTO

Lavra

A maior parte dos minérios de bauxita lavrados são gibbsíticos, seguidos por aqueles compostos de gibbsita, bohemita. As diferenças nas composições dos minerais influenciam o processamento dos mesmos.

Os métodos de lavra dos minérios de bauxita variam de acordo com a natureza dos corpos mineralizados das jazidas. A lavra destes minérios é feita, na maior parte, a céu aberto, segundo o método por tiras (*strip mining*). Estima-se que o maior número das jazidas de bauxita laterítica é lavrada por métodos a céu aberto (Röhrlich *et al.*, 2001). Menos de 20% da produção de bauxita no mundo é obtida por métodos de lavra subterrânea. O nível de mecanização na lavra é diversificado, dispondo-se desde a lavra manual até os métodos, modernos com diversos tipos de equipamentos de mineração.

Processamento

O fato mais curioso na área de processamento mineral é que as técnicas comuns de beneficiamento do minério aplicam-se, parcialmente, aos minérios de alumínio. Na verdade, isso se justifica pelo fato de haver disponibilidade de minérios de bauxita com elevado teor (Al_2O_3), os quais não exigem processos de tratamento mais elaborados. Além disso, as impurezas de alguns tipos de bauxitas estão associadas aos minerais de alumínio, dificultando a purificação por meio mecânico, ou mesmo inviabilizando economicamente o processo de remoção das impurezas. Esses fatos comprovam o número reduzido de trabalhos publicados na área de beneficiamento de minérios de bauxita nos últimos anos. Todavia, com a demanda acentuada dos produtos minerais e elevação dos preços, presume-se, como resultado, um maior número de trabalhos publicados, principalmente, no sentido de se aproveitar os depósitos marginais de bauxita, inclusive, a remoção de sílica reativa dos minérios de alumínio. A sílica reativa, associada aos compostos de ferro e titânio, é responsável direto pelas condições de processamento dos minérios de alumínio.

Mesmo assim, os métodos de beneficiamento de minérios usados no processamento dos minérios de alumínio incluem: britagem, atrição e peneiramento para remoção da fração argilosa e dos minerais de sílica. A separação em meio denso promove a remoção de ferro e laterita dos minérios com granulometria acima de 1,0 mm, por meio de equipamentos como

Dynawirlpool, para a maioria dos casos. Espirais de Humphreys e separadores magnéticos, com campos superiores a 1,5 T, são utilizados para remoção dos minerais paramagnéticos, reduzindo os teores de Fe_2O_3 e TiO_2 . Em algumas operações, o minério é particularmente secado para facilitar o manuseio e/ou minimizar os custos de transporte. Nesta etapa, procede-se à filtragem, elevando-se a percentagem de sólidos de 25 para 60%, seguida de secagem em vaporizador (*spray dry*) para obtenção de um produto final com 5% de umidade. Desse modo, obtém-se um produto final que pode ser usado tanto no processo de calcinação, bauxita para fins não metalúrgicos, quanto no processo Bayer, bauxita para fins metalúrgicos, que constitui a quase totalidade do consumo.

Cabe lembrar que a produção de bauxitas não-metalúrgicas emprega as mesmas técnicas de beneficiamento usadas para a bauxita de grau metalúrgico. Já o processo de calcinação, cuja função é remover a água quimicamente combinada, somente é aplicado para as bauxitas não-metalúrgicas, com a exceção da bauxita para produtos químicos.

Beneficiamento da Bauxita para Fins Não-Metalúrgicos

As especificações da bauxita refratária exigem baixo teor de ferro e álcalis. Portanto, a separação magnética com intensidade de campo acima de 1,5 T é o método mais utilizado para remoção dos minerais de ferro, especificamente, os paramagnéticos. As principais operações do circuito de beneficiamento da bauxita são as seguintes:

- (i) formação de uma polpa com 25% de sólidos com minério de bauxita, seguida de atrição e classificação, a úmido, em 74 μm , para remoção da fração fina;
- (ii) separação magnética para remoção de Fe_2O_3 e TiO_2 ;
- (iii) filtragem, para elevar a percentagem de sólidos de 25 para 60%, seguida de secagem em vaporizador (*spray dry*), obtendo um produto final com 5% de umidade;
- (iv) extrusão, quando necessária, e calcinação da bauxita beneficiada, seguida do acondicionamento do produto para expedição.

Beneficiamento de Minério de Alumínio para Fins Metalúrgicos

No beneficiamento de minérios de alumínio para fins metalúrgicos necessita-se de cuidado especial com a razão mássica $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, que provoca um

efeito significativo sobre o processo Bayer. Na maioria das vezes, seu valor deve ser maior que 10. Quando há predominância de diásporo no minério de bauxita, o valor da razão mássica torna-se menor que 10. Neste caso, procede-se à sinterização do minério antes de submetê-lo ao processo Bayer para, então, produzir uma alumina com um determinado teor de Al_2O_3 . O processo de sinterização demanda um consumo elevado de energia, com significativo impacto ambiental e um elevado custo de produção da alumina, em decorrência do consumo de energia.

Diante desses fatos, torna-se desejável aumentar a razão mássica ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) por meio de processos físicos ou físico-químicos de beneficiamento. Assim, o processo Bayer pode ser aplicado diretamente, isto é, sem a sinterização prévia do concentrado de bauxita, com menor impacto ambiental e baixo custo de produção da alumina. Neste contexto, a flotação pode ser empregada como processo complementar de concentração da bauxita, por tratar-se de um processo capaz de remover a sílica livre e a caulinita contidas no minério (Yoon e Shi, 1989).

No caso dos minérios de bauxita com predominância de diásporo, cerca de 70%, a massa remanescente constitui os minerais de gangas a serem removidos. Nesse caso, a flotação consiste na alternativa mais adequada. Dentre estas impurezas, destacam-se: caulinita, pirofilita, óxidos de titânio e ilita, que devem ser removidas. Desse modo, torna-se possível a concentração do diásporo por meio de flotação, utilizando coletores aniônicos, enquanto os aluminossilicatos são deprimidos com depressores inorgânicos. Entretanto, a flotação direta acontece com elevada concentração de coletores para se alcançar uma recuperação de 80%, resultando num elevado custo operacional. Além disso, os coletores adsorvidos no concentrado podem prejudicar o processo Bayer. Esses impedimentos respondem pela ausência da flotação direta das bauxitas, com predominância de diásporo, na prática industrial (Hu *et al.*, 2003). Tal fato conduz a um duplo incentivo ao uso da flotação reversa como processo de enriquecimento desses minérios de bauxita. Primeiro, contempla a questão ambiental, com a ausência da sinterização e, em segundo lugar, a viabilidade técnica de operação do processo Bayer com concentrados de bauxitas obtidos por meio de flotação. Adicionalmente, há uma prática já consagrada da flotação reversa de silicato, por exemplo, na purificação de caulinita (Yoon, 1992).

Processos de Obtenção de Alumina (Al_2O_3)

A alumina para diversos fins pode ser obtida por um dos quatro processos ilustrados no Quadro 1. No entanto, o mais utilizado e, portanto, conhecido é o processo Bayer. Neste trabalho apenas o processo Bayer será relatado com detalhes.

Quadro 1 – Processos de obtenção de alumina (Al_2O_3).

<p>Bauxita</p> <p>↓</p> <p>NaOH</p> <p>↓</p> <p>Digestão</p> <p>↓</p> <p>Precipitação</p> <p>↓</p> <p>$\text{Al}(\text{OH})_3$</p> <p>↓</p> <p>Calcinação</p> <p>↓</p> <p>Al_2O_3</p>	<p>$\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$</p> <p>+</p> <p>$\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2$</p> <p>↓</p> <p>$\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$</p> <p>↓</p> <p>Purificação</p> <p>↓</p> <p>Decomposição</p> <p>↓</p> <p>$\text{Al}_2\text{O}_3 - \alpha$</p>	<p>Al^0</p> <p>↓</p> <p>$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$</p> <p>↓</p> <p>$\text{Al}(\text{OC}_3\text{H}_7)_3$</p> <p>↓</p> <p>Hidrólise</p> <p>↓</p> <p>$\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Gel}$</p> <p>↓</p> <p>Calcinação</p> <p>↓</p> <p>$\text{Al}_2\text{O}_3 - \alpha$</p>	<p>Esferas do Metal Al</p> <p>↓</p> <p>H_2O</p> <p>↓</p> <p>Descarregamento do arco</p> <p>↓</p> <p>$\text{Al}(\text{OH})_3$</p> <p>↓</p> <p>Calcinação</p> <p>↓</p> <p>$\text{Al}_2\text{O}_3 - \alpha$</p>
Processo Bayer	Processo Alum	Rota Al - Isopropóxido	Processo Iwatani
Al^0 = Alumínio metálico			

Fonte: High -Tech, 1988.

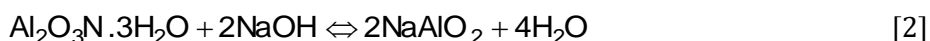
Processo Bayer para Obtenção de Alumina

O concentrado de bauxita moída, em geral, abaixo de 208 μm e uma razão mássica ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) maior que 10, é misturado a uma solução de soda cáustica, com a qual reage sob pressão, em reatores com dimensões de 5X30 m. Nestas condições, a bauxita dissolve-se formando uma solução de aluminato de sódio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), enquanto as impurezas permanecem na fase sólida e são conhecidas como “lama vermelha”. Outras impurezas consistem na presença de certos minerais nos concentrados de bauxita, mesmo em concentrações pequenas, que ainda afetam a operação do processo Bayer e a qualidade da alumina. Basicamente, essas impurezas se dissolvem em solução cáustica, proporcionando a lixívia, dentre as quais destacam-se: fósforo, vanádio, zinco e

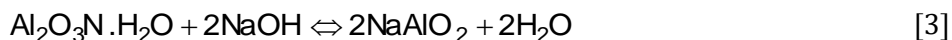
matéria orgânica. Adicionalmente, o processo químico, como um todo, é afetado quando ocorrem as interações de outras matérias-primas requeridas no processo e o efeito acumulativo de compostos na circulação do licor. Isso contribui, de forma negativa, à operação do processo e à qualidade final da alumina.

Neste contexto, são fundamentais para a digestão química dos minerais da bauxita as reações químicas da alumina e dos minerais de sílica com a solução de soda cáustica. Mudanças de fases importantes podem ocorrer com os minerais de ferro. Tais mudanças afetam a clarificação da lixívia. As reações químicas básicas que ocorrem no processo Bayer estão descritas abaixo.

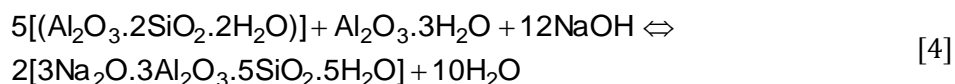
Para a gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)



Para a boehmita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)



Para os minerais de argilas (i.e., caulinita, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)



Nos casos de minérios de baixo teor de alumina e com cerca de 8% de SiO_2 , a lama vermelha, resultante do processo Bayer, pode ser sinterizada na faixa de temperatura entre 1.150 e 1.260°C, com calcário e barrilha. Essa etapa adicional do processo permite recuperar a alumina e o sódio combinado com a sílica. A natureza e a concentração do mineral de alumínio contido na bauxita determinam a temperatura de digestão da rocha, pressão e concentração de soda cáustica.

A digestão acontece segundo um período de lixiviação de até 5 h, sendo que a faixa operacional de pressão (4,0-8,0 atm) depende da temperatura de digestão, que varia entre 100 e 250°C, de acordo com as concentrações de gibbsita, boehmita e diásporo na bauxita (McCormick *et al.*, 2002). Como regra geral, quanto maior a concentração de gibbsita no concentrado de bauxita, menor será a temperatura da digestão. Essa temperatura se eleva quando há predominância de diásporo na composição da bauxita. Entretanto, a lixiviação de bauxita com soda cáustica não somente dissolve a maior parte da bauxita, como

também parte da sílica contida no concentrado de bauxita. A sílica ocorre de duas formas: sílica reativa, principalmente caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), e quartzo. A caulinita é prontamente atacada pela soda cáustica formando silicato de sódio que, por sua vez, reage com a solução de aluminato de sódio para formar um composto insolúvel denominado sílico aluminato de sódio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), descartado do processo na lama vermelha, resultando na perda de soda cáustica e de alumina (Sevryukov *et al.*, 1950). São relatadas, na literatura, outras fórmulas para o sílico aluminato de sódio, como, por exemplo, $2\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Habashi, 1980) ou $3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Pagin *et al.*, 1983). A adição de CaO facilita a precipitação completa da sílica dissolvida, por meio da formação do silicato de cálcio, que é insolúvel. O quartzo não se dissolve facilmente na solução de soda cáustica, nos processos a baixas temperaturas. Todavia, nas operações com temperaturas elevadas, ele se dissolve com facilidade. Essas condições são exigidas pelo processo Bayer, para dissolução de bauxitas com elevadas concentrações de boehmita e diásporo. Nesse caso, aumentam as perdas de alumina, como também, de soda cáustica, para formar os produtos silicatados. Cabe lembrar que, para cada tonelada de sílica dissolvida durante a digestão, são consumidas cerca de 1,0 t de soda cáustica e 1,0 t de alumina, para formar os produtos silicatados necessários à remoção da sílica dissolvida da solução. A composição estequiométrica do sílico aluminato de sódio provavelmente está associada às condições da precipitação. Estima-se que a obtenção de alumina, com base em bauxitas com elevado teor de sílica, provoca um aumento da ordem de 20% nos custos operacionais, segundo O'Connor, citado por McCormick *et al.* (2000). Por essas razões, minérios de bauxitas com teores de sílica reativa superiores a 5% são considerados antieconômicos para o processo Bayer.

Após essa digestão, a polpa resultante segue para o processo de redução em uma série de reatores à pressão, espessadores e filtros. A solução resultante segue para as torres de resfriamento e daí aos precipitadores, nos quais a alumina trihidratada é então cristalizada. Essa etapa de precipitação é acelerada pela adição de sementes, material fino obtido em uma etapa de classificação posterior à precipitação. Em seguida, o produto é filtrado, lavado, secado e calcinado, obtendo-se, então, a alumina sob a forma pura. Por conseguinte, no fluxograma da Figura 1 ilustram-se as etapas do ciclo relativo ao processo Bayer. A alumina obtida pelo processo Bayer é considerada de boa qualidade quando possui, entre outras, as características ilustradas na Tabela 2. Na Figura 2 ilustram-se as etapas do processo Bayer utilizado pela Alunorte em Barcarena no estado do Pará.

A produção de alumina, é feita pelos países: Brasil, Austrália, Estados Unidos, Jamaica, Rússia e Índia, que mantêm cerca de 50% da produção mundial. A massa de alumina produzida pelo processo Bayer é convertida em alumínio metálico, por meio de redução eletrolítica, em banho fundido de criolita natural ou sintética, utilizando o processo Hall-Hérout.

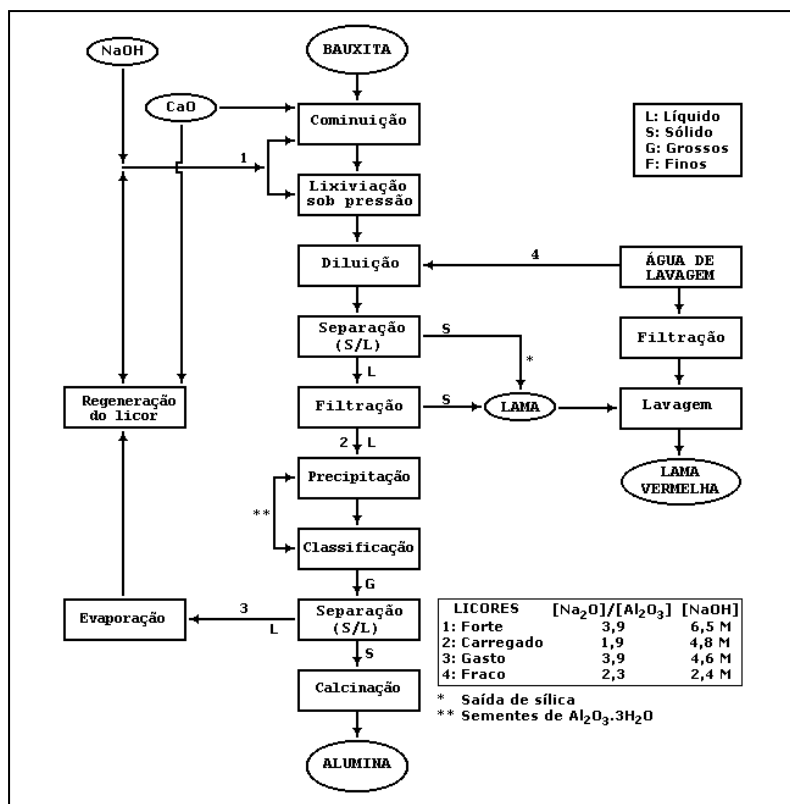


Figura 1 – Descrição ilustrativa das etapas relativas ao ciclo do processo Bayer.

Processo Hall-Hérault

O alumínio metálico é produzido, em escala comercial, por meio de eletrólise da alumina obtida, praticamente, pelo processo Bayer. A redução direta do óxido de alumínio para alumínio metálico até hoje não é um processo competitivo. O processo eletroquímico utilizado na obtenção desse metal consiste na eletrólise da alumina dissolvida em criolita ($3\text{NaF}\cdot\text{AlF}_3$) fundida (p.f. 1.010°C), com baixas concentrações de aditivos não decompostos (ex. fluoretos de alumínio, cálcio, magnésio e lítio). A mistura atua como fundente da alumina. Com a passagem da corrente contínua através da solução, o oxigênio migra para o anodo de carbono com o qual reage, gerando dióxido de carbono na superfície anódica. Ao mesmo tempo ocorre a redução do alumínio na superfície do catodo, conforme as equações seguintes (Monte *et al.*, 1994).

Reação catódica



Reação anódica



Também no anodo

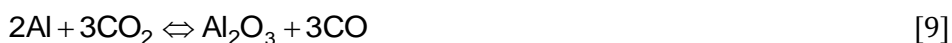


Adicionando-se as três equações, obtém-se a reação global de redução do alumínio com base em alumina, Al_2O_3 :



O potencial reversível desta reação, calculado com base em dados termodinâmicos, é de 1,15 V. Na prática comercial, a tensão de decomposição está na faixa de 1,5-1,7 V, principalmente, devido à sobretensão anódica. A resistência ôhmica de condutores e eletrodos aumenta a tensão de operação da célula de 4 para 5 V.

Na prática, o alumínio é depositado no catodo, com eficiência farádica de 85-90%. A perda na eficiência deve-se, principalmente, à reoxidação do alumínio depositado no catodo, pela ação do CO_2 gerado no anodo (Huglen *et al.*, 1986), segundo a reação a seguir:



Os metais que possuem um potencial de redução menos negativo que o do alumínio ($E^{\circ} = -1,662 \text{ V}$, em água a 25°C) dissolvidos no eletrólito são reduzidos e aparecem em quantidades variadas no alumínio. Aqueles com potenciais de redução mais elevados, como lítio, cálcio, sódio e magnésio, permanecem no eletrólito. Alguns dos óxidos não-metálicos (ex.: os fosfóricos) atuam como venenos, reduzindo a eficiência farádica.

A eletrólise é realizada em temperaturas na faixa de $10\text{-}20^{\circ}\text{C}$, acima do ponto de fusão do eletrólito. A faixa operacional de temperatura do eletrólito, entre 935 e 975°C é considerada típica, e o teor de alumina varia entre 1 e 6%. Quando a concentração de alumina aproxima-se de 1%, uma reação diferente ocorre no anodo, que forma um filme de gás com elevada resistência na superfície anódica, o que provoca um aumento na tensão da célula para uma faixa de 20 a 40 V. Tal condição recebe a denominação de efeito anódico. A eletrólise normal volta ao estado inicial, com o aumento da concentração da alumina e a ruptura do filme de gás sobre a superfície anódica.

Embora a eletrólise possa ser feita usando-se apenas criolita como fundente, descobriu-se que certos aditivos, como fluoreto de alumínio, aumentam a eficiência farádica. A adição de fluoreto de cálcio diminui a temperatura de operação, isto é, reduz o ponto de fusão do eletrólito, entretanto, há o inconveniente de aumentar a densidade do banho. Já o fluoreto de lítio, normalmente adicionado na forma de carbonato, aumenta a condutividade elétrica do banho e diminui sua densidade. O fluoreto de magnésio, também contido no banho em algumas usinas, é geralmente adicionado na forma de MgO , para aumentar a condutividade e diminuir a densidade do eletrólito; porém o seu uso, assim como o do fluoreto de lítio, está limitado a pequenas quantidades, porque, em caso de co-deposição com o alumínio, prejudicam suas propriedades mecânicas (Grjotheim e Welch, 1980).

A demanda de energia elétrica para produção de alumínio é significativamente elevada. Dessa forma, o processo de obtenção de alumínio foi aperfeiçoado com a finalidade de otimizar o consumo de energia. Cabe lembrar que, em 1940, a indústria consumia cerca de 24.000 kWh/t de alumínio produzido. Atualmente, esse valor caiu para 13.000 kWh/t . Todavia, ainda se atribui ao processo o ônus de ser aquele que mais demanda energia entre todos os processos metalúrgicos (Mártires, 2001). Esses argumentos justificam a localização das unidades industriais para produção de alumínio metálico próximas às hidrelétricas, às minas de carvão, ou mesmo em países onde há energia elétrica com abundância e baixo custo.

4. USOS E FUNÇÕES

Ao examinar as aplicações da bauxita deve-se, de imediato, imaginar o mundo sem alumínio, o principal produto obtido com base nessa rocha. O metal constitui uma contribuição chave à eficiência de veículos automotores, bem como nos trens de alta velocidade e, finalmente, na indústria naval, dentre outras. Há, também, a produção de ligas metálicas e/ou equipamentos resistentes à corrosão. O alumínio encontra aplicação, com sucesso, na produção de embalagens para gêneros alimentícios de qualidade, eliminando desperdícios, reduzindo peso e economizando combustível no transporte, além de minimizar a emissão de efluentes. Em todo o mundo, a transmissão aérea de energia elétrica a grandes distâncias é feita por meio de cabos de alumínio. No tratamento da água, não deve ser omitido o uso do sulfato de alumínio como coagulante, proporcionando a remoção de materiais indesejáveis ou mesmo ofensivos, na maioria das vezes contidos no líquido.

A bauxita, para usos não-metalúrgicos, tem restrições específicas com respeito aos teores de: alumina, sílica, ferro e titânio. Essas bauxitas são usadas com maior frequência na produção de: abrasivos, refratários, produtos químicos e cimento. Quando a bauxita é calcinada, os constituintes mais voláteis são liberados, restando uma mistura de coríndon e mullita, cujo teor de Al_2O_3 permanece entre 80 e 90%.

Bauxita para Abrasivos

A bauxita grau abrasivo é usada na produção de alumina fundida aplicada na fabricação de equipamentos de moagem, de polimento e de meio moedor. Bauxitas de diferentes teores são usadas na produção de alumina marrom de baixa qualidade, enquanto que a obtenção de alumina fundida, de alta qualidade, é feita com base em outra alumina. O critério aplicado na avaliação da bauxita para produzir alumina marrom baseia-se nas características químicas e físicas. As combinações importantes são: Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 , álcalis e água. O conteúdo de alumina deve ser o mais elevado possível para maximizar a produtividade e reduzir as impurezas. A propósito, a bauxita fundida em forno elétrico a arco produz alumina ou coríndon artificial que tem um teor de Al_2O_3 de 94-97%, dureza 9, densidade de 3,94 a 3,98 e ponto de fusão de 2.050°C. Esse material é usado nos abrasivos, nos pós ópticos, nos antiderrapantes e nos refratários. Além disso, a bauxita deve conter: elevado teor de alumina, SiO_2 abaixo de 7%, relação ferro/sílica menor que 3, teor de óxido de titânio entre 2-4% e baixo teor de álcalis.

Bauxita para Refratários

A obtenção de alumina refratária inicia-se com a calcinação de uma bauxita também refratária, em temperaturas que variam entre 925 e 1.040°C. Neste processo, duas toneladas de bauxita beneficiada produzem uma de bauxita calcinada, além de promover:

- (i) a remoção de toda água livre ou combinada;
- (ii) reações do estado sólido convertendo minerais silicatados (argilas) em mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$);
- (iii) transformações de fases dos minerais de alumínio, em que parte da alumina é absorvida com a sílica e outra forma alumina-alfa (coríndon).

A bauxita para uso refratário deve encerrar elevado teor de alumina. Para tanto, são exigidos baixos teores de: ferro, dióxido de titânio (<4%) e de álcalis. Tais exigências estão longe de acontecer com as bauxitas comuns, e a obtenção de bauxita refratária com qualidade elevada está restrita, em grande parte, à China, à Guiana e ao Brasil. Além do que, na produção de refratários de alta-alumina para as indústrias de ferro e aço, cimento e de vidro, a bauxita calcinada pode ser misturada com quartzo para formar mullita sintética, com zircônio, formando abrasivos, ou com calcário para produzir cimento de aluminato de cálcio (CAC), usado como um ligante refratário.

Bauxita para Produtos Químicos

Os produtos mais importantes obtidos com base na bauxita grau químico são: sulfatos, cloretos e fluoretos de alumínio, aluminato de sódio e acetato de alumínio. A seleção da bauxita para a produção direta do sulfato de alumínio depende da solubilidade relativa em solução sulfúrica das fases do processo. Entre os três minerais de alumínio: a gibbsita é o mais solúvel, a boehmita tem solubilidade média e o diásporo é o menos solúvel (Tabela 1). Em segundo lugar, a razão alumina/ferro deve ser considerada. Para a bauxita grau químico, exige-se uma relação de 100/1. Entretanto, a especificação normal exige uma relação de 23/1. Esta relação proporciona uma solução amarela pálida, preferida por muitos consumidores. Tais exigências baseiam-se em preferências históricas e não em considerações científicas. Todavia, não deixa de ser mais uma razão dos consumidores escolherem bauxitas com elevado teor de gibbsita.

O sulfato de alumínio é a fonte do íon Al^{3+} que atua como agente coagulante no tratamento de água. Outros usos incluem: perspirante, clarificador para gorduras e óleos, desodorizador, descolorizador nos processos de petróleo, material resistente ao fogo e tingimento de couro. O sulfato de alumínio grau puro, livre de ferro, é empregado como agente de cobertura na indústria de papel. É obtido pela digestão de trihidrato de alumínio, resultado do processo Bayer, com ácido sulfúrico. A alumina trihidratada (ATH), $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, é usada como produto básico na manufatura de certas aluminas, incluindo alumina ativada, como também: acetato de alumínio, borato, carbetto, cloridrato, cloreto, fluoreto, nitreto, oleato, dentre outros.

Bauxita para Cimento

Dois tipos de cimento são produzidos de acordo com o teor de ferro. O cimento de baixo ferro, que é conhecido como cimento de aluminato de cálcio, é usado como cimento refratário para unir os refratários de alta alumina. As vantagens são: maior densidade, porosidade mais baixa e menor contração do corpo do moldado. Essa condição reduz a penetração através do metal fundido e com elevada resistência dos produtos fundidos e curados. Algumas bauxitas de baixo teor, com alto ferro e sílica, são também usadas como aditivo, na produção do cimento Portland.

Cimento de alta alumina contém de 55 a 56% de Al_2O_3 e menos de 4% de SiO_2 . A produção deste tipo de cimento baseia-se na fusão de calcário e bauxita (que substitui a argila ou xisto) no cimento Portland e moagem do clínquer. O cimento resultante é composto de aluminatos de cálcio mais aluminossilicatos, a fim de que ele resista à corrosão quando exposto à água do mar. Cimento de alta alumina é também usado onde a resistência estrutural deve ser desenvolvida dentro de 24 h e em refratários. Cimentos com diferentes teores de alumina exigem diferentes teores de bauxita – baixo teor de ferro, isto é, Fe_2O_3 abaixo de 2,5%. Em ambos os casos a relação $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ deve ser 10/1 ou a bauxita usada deve conter menos que 6% de sílica.

Bauxita Usada na Recuperação Secundária de Gás Natural e Petróleo

A bauxita calcinada, grau abrasivo, exibe elevada resistência à pressão e pode ser usada pelas indústrias de gás natural e petróleo para manter abertas (*prop open*) as fraturas rochosas nos horizontes produtores, habilitando o hidrocarboneto a fluir mais livremente. O produto, nas versões *sinterlite* e *sinterball*, atua como agente de sustentação, que é misturado a um líquido

viscoso e injetado nos poços auxiliares dos campos de gás natural e de petróleo. O fluido, bauxita sinterizada mais um líquido viscoso, penetra nas fraturas da rocha com pressão da ordem de 1.020 atm (15.000 psi), mantendo-as abertas para passagem do gás ou óleo e, quando se reduz a pressão, a fratura permanece aberta, proporcionando o fluxo do hidrocarboneto. Os produtos utilizados para essa finalidade foram inventados nos anos de 1970, nos Estados Unidos, pela *Exxon Petroleum*, onde recebeu o nome de *proppant*, uma forma contraída da expressão inglesa, *prop open*. No Quadro 1 encontram-se as classes de alguns desses produtos com os respectivos materiais que lhes deram origem.

Quadro 2 – Classe dos agentes de sustentação utilizados nos campos de produção de gás natural e petróleo.

(%)	Descrição
85	De alta resistência, manufaturados com base em bauxitas grau abrasivo - produtor Mineração Curimbaba. Incluem-se os produtos <i>sinterliter</i> e <i>sinterball</i> .
70	Produzido com base em: bauxita, caulim ou areia de quartzo.
50	Produzido com base em caulim.
40	Produzido com base em caulim e areia de quartzo.
30	Produzido com base em caulim e areia de quartzo.

A areia de quartzo também é utilizada como “propante” no caso de formação rochosa com permeabilidade elevada e poços mais rasos, visto que este produto possui resistência à degradação menor que os produtos obtidos com base em bauxitas grau abrasivo.

Quando o tamanho do grão aumenta, os produtos tornam-se muito vulneráveis a falhas. Entretanto, aqueles mais finos podem restringir a sua melhor performance. A bauxita oferece maiores resistências, tanto à pressão quanto à fragmentação, que os demais produtos, tais como: cerâmicas, granadas, areia de quartzo e caulim. A bauxita se deforma, ligeiramente, quando a fratura começa a fechar. No entanto, não se fragmenta em grãos mais finos. Assim, é possível obter produtos com base em bauxitas sinterizadas, capazes de resistir à pressão de 1.020 atm (15.000 psi) (Crossley, 2002).

O processo de obtenção desses produtos consiste na pulverização da bauxita sinterizada, seguida da formação de minúsculas pelotas, por um processo de pelletização. Na etapa seguinte, o produto é secado e submetido a um aquecimento, que lhe confere as características exigidas para a aplicação. O nível de resistência do produto de bauxita depende da pureza do minério e sua resistência aumenta com teor de Al_2O_3 . Na Tabela 3, encontram-se as distribuições granulométricas dos materiais (bauxita sinterizada e areia de quartzo) utilizados na perfuração de poços de petróleo.

O mercado mundial deste produto está estimado em 200.000 t/ano, incluindo aqueles de areia de quartzo, com baixa resistência. A maioria das unidades produtoras trabalha em plena capacidade e planeja expansões para atender a crescente demanda do produto (Crossley, 2002).

As empresas de perfuração para produção de gás natural e petróleo terão mais facilidade de pesquisa e exploração nas plataformas, com o uso destes produtos de bauxita de alta resistência. Desse modo, constata-se uma demanda de sondagens em grandes profundidades, exigindo maiores volumes destes produtos com resistência elevada. Como os hidrocarbonetos tornaram-se cada vez mais difíceis de se encontrar, as companhias petrolíferas são obrigadas a explorar reservatórios de baixa permeabilidade e em rochas intensamente fraturadas. Essas são situações menos favoráveis para a exploração comercial. Tais fatos garantem a demanda potencial para os produtos de bauxita sinterizada com elevada resistência à fragmentação. Neste contexto, a Mineração Curimbaba tornou-se um fornecedor desse produto de bauxita e, hoje, dispõe de uma capacidade instalada capaz de atender toda a demanda dos mercados nacional e norte-americano (Crossley, 2001).

Tabela 3 – Distribuições granulométricas da bauxita sinterizada e areia de quartzo empregadas, pela PETROBRAS, na perfuração de poços de petróleo.

Bauxita Sinterizada			Areia de Quartzo		
Abertura (μm)	Percentagens em peso		Abertura (μm)	Percentagens em Peso	
	Retida	Passante		Retida	Passante
+833	3,95	96,05	+1.397	11,99	88,01
+589	80,36	15,69	+833	82,91	5,10
-589	15,69	-	+589	4,75	0,35
-	-	-	-589	0.35	-

Alumina Utilizada na Fabricação de Prótese Humana

As cerâmicas de alumina com elevada densidade e pureza ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 99,5\%$) são usadas na fabricação de próteses humanas, especificamente, de quadris e dentárias. Tais aplicações se devem à sua excelente resistência à corrosão, elevado índice de biocompatibilidade, elevada resistência ao desgaste e alta resistência mecânica. Além disso, o produto favorece a formação de uma fina camada de tecido fibroso que envolve a peça cerâmica, permitindo uma ótima fixação do implante. Esses e outros motivos favoreceram a intensa utilização de cerâmicas à base de alumina, em próteses humanas, nos últimos 20 anos.

Alguns implantes dentários são monocristais, entretanto as peças cerâmicas de alumina são granulados finos policristalinos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\alpha$, prensados e sinterizados numa faixa de temperatura entre 1.600 e 1.700°C. Na sinterização, é adicionada pequena quantidade de óxido de magnésio ($\text{MgO} < 0,5\%$) para auxiliar o processo e limitar o crescimento dos grãos durante a sinterização.

As resistências à fadiga, a resistência mecânica e a tenacidade à fratura dos materiais cerâmicos policristalinos à base de Al_2O_3 são propriedades mecânicas que dependem do tamanho do grão e da percentagem de aditivos usados na sinterização. As cerâmicas de alumina com tamanho médio do grão menor que 4 μm e pureza acima de 99,7% exibem boa resistência à flexão e excelente resistência à compressão.

5. ESPECIFICAÇÕES

Na Tabela 4, encontram-se algumas propriedades físicas e mecânicas das biocerâmicas de alumina, estabelecidas pela Organização Internacional de Padrões, ISO. Por outro lado, o uso de bauxita para fins não-metalúrgicos exige teores de Al_2O_3 mais elevados e menores para: SiO_2 ; Fe_2O_3 e TiO_2 , comparados aos teores dos mesmos óxidos para a bauxita metalúrgica, conforme ilustrado na Tabela 5. A Tabela 6 ilustra as especificações da bauxita calcinada, da mullita sintética fundida e da alumina trihidratada. Constam, na Tabela 7, as especificações da bauxita segundo a sua aplicação, inclusive as especificações da bauxita comercial calcinada, da mullita sintética fundida e do trihidrato de alumínio.

Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas das biocerâmicas de alumina estabelecidas pela Organização Internacional de Padrões, ISO.

Propriedades	Cerâmica com elevada pureza de alumina	ISO – 6474
Alumina - % em peso	> 99,8	> 99,5
Densidade (g/cm ³)	> 3,93	> 3,90
Tamanho médio do grão (µm)	3 - 6	< 7
Dureza Vicker (número de dureza) VHN	2.300	> 2.000
Resistência à compressão (MPa)	4.500	-
Resistência ao dobramento (MPa, após o teste em solução de Ringer)	550	400
Módulo de Young (Gpa)	380	-
Tenacidade à fratura (K_{1C}) (MPa.m ^{1/2})	5 - 6	-
Tamanho da trinca (µm)	10 - 52	-

Tabela 5 – Alguns produtos de bauxita produzidos pela Mineração Curimbaba.

Bauxitas Sinterizadas / Calcinadas					
Tipo Especial					
Aplicação	Fraturamento e Jateamento	Fraturamento	Jateamento	Pisos e Pavimentos	
Produto	SinterBall™	SinterLite™	SinterBlast	Super Sinter	
Análise Química (%)					
Al ₂ O ₃	76,5	71,7	76,0	78,6	
Fe ₂ O ₃	15,5	13,0	15,4	13,3	
SiO ₂	5,3	12,8	5,9	5,95	
TiO ₂	1,8	1,8	1,6	1,49	
CaO+MgO	0,3	0,1	0,5	0,19	
K ₂ O+ Na ₂ O	0,4	0,4	0,4	0,37	
Solubilidade (HCl+HF) (%)	< 6	< 6	-	-	
Arredondamento	0,9	0,9	-	-	
Esfericidade	0,9	0,9	-	-	
Densidade aparente (g/cm ³)	2,24	1,98	2,0	2,15	
Massa específica (g/cm ³)	3,62	3,25	3,60	3,76	
Res. Compres.(% finos, psi)	2,5%, 12.500	4,2%, 8.000	21%, 7.500	21%, 7.500	
Dureza (Mohs)	9	9	9	9	
Cor	Negro	Negro	Negro	Negro	
Fases Cristalinas					
Alumina	Predominante	Predominante	Predominante	Predominante	
Hematita	Secundária	Secundária	Secundária	Secundária	
Sílica livre	Não	Não	Não	Não	
Ferro metálico livre	Não	Não	Não	Não	
Formato do grão	Esférico	Esférico	Angular	Angular	
Granulometria típica	14/20, 16/20, 16/30, 20/40 30/50	16/20, 20/40	8/16, 10/20, 20/40, 40/70 70/120, 120/180	6/14, 10/20, 20/40	
Tipo Abrasivo					
Aplicação	Eletrofusão	Fluxo de Soda	Polimento de Superfícies		
Produto	Regular	Especial	BC-5	BC-8	BC-11
Análise Química (%)					
Al ₂ O ₃	77,6	81,5	75,6	75,8	73,8
Fe ₂ O ₃	14,0	8,75	13,4	14,7	15,5
SiO ₂	5,60	7,68	6,97	7,35	8,29
TiO ₂	1,80	1,38	1,86	1,96	2,04
K ₂ O+ Na ₂ O	0,5	0,16	-	-	-
Perda por calcinação	0,1	0,10	1,00	0,49	0,05
Umidade	0,02	0,02	0,80	0,16	0,15
Porosidade aparente (%)	20,7	31,0	-	-	-
Absorção aparente (%)	7,2	12,2	-	-	-
Densidade aparente (g/cm ³)	3,0	2,53	-	-	-
Massa específica (g/cm ³)	3,64	3,67	-	-	-
Densidade solta(g/cm ³)	-	-	0,7	1,1	1,4
Densidade batida (g/cm ³)	-	-	0,9	1,3	1,7
Absorção em óleo (%)	-	-	37,0	21,0	18,0
Cor	-	-	Vermelha	Rosa	Cinza Claro
Fases Cristalinas					
Alumina-α	Predominante	Predominante	Predominante	Predominante	Predominante
Hematita	Secundária	Secundária	Secundária	Secundária	Secundária
Mullita	-	-	Traços	Secundária	Secundária
Gibbsita	-	-	Secundária	-	-
K-Alumina	-	-	Secundária	-	-
Granulometria típica	A Granel	80MF, 100MF	325	325	325

Tabela 6 – Bauxitas calcinada e sinterizada, ambas grau químico, produtos da Mineração Curimbaba, Poços de Caldas-MG.

Aplicação	Purificação e Filtragem	Aplicação	Sulfato de Alumínio
Produto	Ativada	Produto	Seca e Moída
Análise Química (%)			
Al ₂ O ₃	71,5	Al ₂ O ₃	54,0 Mín
Fe ₂ O ₃	12,8	Fe ₂ O ₃	12,0 Máx
SiO ₂	10,5	SiO ₂	6,0
TiO ₂	1,88	TiO ₂	1,40
Perda por calcinação (%)	2,74	K ₂ O+ Na ₂ O	0,34
Umidade (%)	3,0 Máx	Resíduo insolúvel (H ₂ SO ₄)	7,5 Máx
Granul. Típica (malhas)	20/60	Perda por calcinação	27,5
Distribuição Granulométrica (% Máx)		Umidade	5,0 Máx
+20#	5,0	Fases Cristalinas	
-20+60#	95,0	Gibbsita	Predominante
-60#	2,0	Hematita	Secundária
Perda por abrasão (%)	24,0 Máx	Granulometria	
Volumes dos poros (%)	30,0	(+100#)	10,0 Máx
Higroscopicidade (%)	8,7	(+200#)	10,0 Máx
Densidade solta (g/cm ³)	0,98		
Adsorção de azo-benzeno	14,0 Mín		

Tabela 7 – Especificações da bauxita por aplicação, bem como da bauxita comercial calcinada, da mullita sintética fundida e do trihidrato de alumínio.

Especificações da bauxita segundo a sua aplicação (Shaffer, 1985)								
Compostos	Bauxita não-metalúrgica – Base calcinada				Metalúrgica			
	Abrasivos	Refratários	Química	Cimento				
Al ₂ O ₃	80-88	84,5 mín.	55 mín.	45-55 min	50-55			
SiO ₂	4-8	7,5 máx.	5-18 máx	6 máx	0-15			
Fe ₂ O ₃	2,5	2,5 máx.	2,0 máx.	< 2,5	5-30 máx			
TiO ₂	2,5	4,0 máx.	0-6	3 máx	0-6			
Abrasivos	Adição de Fe para ajuste da relação Fe ₂ O ₃ / SiO ₂ para formação da escória ferro/silício.							
Refratários	Alta alumina, baixos teores de sílica, óxido de ferro e de álcalis.							
Química	Exige minério com predominância de gibbsita e baixo ferro.							
Cimento	Exige preferencialmente o diásporo.							
Especificações da bauxita comercial calcinada, da mullita sintética fundida e do trihidrato de alumínio (Harben, 1996)								
	Composição Química (%) da Bauxita Comercial Calcinada							
	Abrasivos		Refratários					
	Austrália	Nova Guiné	Guiana	China			Brasil	
RASC	-	-	-	-	85	80	75	-
Al ₂ O ₃ min	80	88	86,5	86				85
Típico	82-84	90	88,3	89	87	84,5	78,6	85-87
SiO ₂ máx	7,0	3,0	7,5	7,0	-	-	-	10,5
Típico	4,7-5,5	1,2	6,5	6,0	6,0	6,5	14,5	8,5-10,0
Fe ₂ O ₃ máx	7,5	8,0	2,5	2,0	1,5	1,5	1,2	2,3
Típico	-	-	1,75	1,2	1,6-2,2	6,0	1,2	-
TiO ₂ máx	-	-	-	3,30	-	-	-	2,4
Típico	3,5-3,8	5,0	3,2	3,30	3,75	4,0	3,5	1,9-2,3
PPI máx	1,0	4,0	0,5	0,50	-	-	-	0,5
Típico	0,5	2,0	0,25	0,05	0,20	0,20	0,2	0,0-0,5
RASC – Refratário A – Super-calcinado PPI – Perda de peso por ignição								
	Composição Química (%) da Mullita Sintética Fundida							
	Alemanha Hüls	Reino Unido Kieth Ceramics	Brasil Elfusa	USA Washington Mills	Hungria Huungalu	Japão Showa Denko		
Al ₂ O ₃	75,25	76,3	72,3	77,7	76,0	76,8		
SiO ₂	24,5	23,3	28,5	21,8	23,0	22,8		
TiO ₂	0,01	0,02	0,0	0,05	0,05	-		
Fe ₂ O ₃	0,05	0,10	0,13	0,12	0,08	0,05		
CaO	0,04	-	0,15	-	0,15	-		
MgO	0,03	-	0,05	-	0,10	-		
Na ₂ O	0,20	0,30	0,38	0,35	0,25	0,19		
K ₂ O	0,01	0,02	0,04	-	-	-		
Especificações da Alumina Trihidratada (ATH = Al ₂ O ₃ .3H ₂ O)								
	Hydral	Hydral	Hydral	Lubral	C-31	C-31	C-37	
Al ₂ O ₃	705	710	710B	710	-	-	-	
SiO ₂	Fino	Fino	Fino	Fino	Grosso	Grosso	Grosso	
Fe ₂ O ₃	64,1	64,1	64,7	64,0	65,0	65,0	64,2	
Na ₂ O (Total)	0,04	0,04	0,07	0,04	0,01	0,01	0,07	
Na ₂ O (Solúvel)	0,04	0,01	0,02	0,01	0,004	0,004	0,004	
Umidade 110°C	0,60	0,45	0,45	0,45	0,15	0,2	0,5	
A granel (g/m ³)	0,22	0,10	0,10	0,10	-	-	-	
Empacotado.(g/m ³)	0,3-1,0	0,3-1,0	0,3-1,0	0,3-1,0	0,04	0,04	0,2	
Área esp. (m ² /g)	0,08-0,14	0,13-0,22	0,13-0,22	0,13-0,2	1,0-11	1,1-1,3	0,8-1,0	
Cor	0,09-0,020	0,26-0,45	0,26-0,45	0,23-0,4	1,2-1,4	1,4-1,6	1,01,1	
Alvura GE	12-15	6-8	6-8	6-8	0,15	0,1	0,2	
Al ₂ O ₃	Branco	Branco	BP	BP	Branco	Branco	-	
BP – Branco pálido								

6. MINERAIS E MATERIAIS ALTERNATIVOS

As pesquisas desenvolvidas com a finalidade de estudar alternativas para extração de alumina com base em matérias-primas que não a bauxita aconteceram, com maior intensidade, por ocasião da Segunda Guerra Mundial. Dentre os substitutos da bauxita investigados, merecem destaques: argila caulínica, alunita ($KAl_3(OH)_6(SO_4)_2$) e anortita ($CaAl_2Si_2O_8$). As razões pelas quais a bauxita ainda é preferida como matéria-prima para obtenção de alumina e, por conseguinte, alumínio metálico, fundamentam-se, entre outros, nos fatos:

- (i) abundante ocorrência de jazidas de bauxita, que podem ser lavradas com baixo custo;
- (ii) processo Bayer permite a conversão de bauxita para alumina ainda com custo economicamente viável e obtenção de um produto final com pureza elevada;
- (iii) localização dos depósitos de bauxitas nos países em desenvolvimento, com produção de energia elétrica a baixo custo.

Essas e outras razões, tornam muito mais distante o desenvolvimento de uma alternativa comercial para obtenção de alumina com base em matéria-prima que não a bauxita.

De forma paradoxal, os substitutos do alumínio são mais comuns em vários setores da aplicação do metal. Assim, o alumínio pode ser substituído pelo cobre em muitas aplicações, principalmente no setor elétrico. O magnésio e o titânio são substitutos do alumínio em diversos usos estruturais e de transporte, porém com custos mais elevados. O aço também é um substituto em aplicações nas quais a economia em peso não é relevante. O aço, o ferro e a madeira competem com o alumínio na indústria da construção civil. Na indústria de embalagens, o aço, o plástico, o vidro e o papel são concorrentes, apesar de o alumínio aumentar sua participação neste setor.

AGRADECIMENTOS

Ao Eng. Carlos Henrique Babsky Neves, da MBR, pelas valiosas informações sobre o beneficiamento de minério de bauxita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANJOS, F. V. e SILVA, J. B. (1983). As usinas de produção de alumínio da ALCAN no Brasil – processo Bayer para produção de alumina e os processos eletrolíticos para a produção de alumínio. In: As usinas brasileiras de metalurgia extrativa dos metais não-ferrosos, ABM, São Paulo.
- CROSSLEY P. (2001). Bauxite. *Industrial Minerals*, p. 27-41.
- CROSSLEY, P. (2002). Abrasive bauxite giving propants the nod. *Industrial Minerals*, p. 36-40.
- GRJOTHEIM, K. e WELCH, B. J. (1980). Aluminium smelter technology – A pure and applied approach. Aluminium-Verlag GMBH.
- HABASHI, F. (1993). A Textbook of Hydrometallurgy. Published by: Métallurgie Extractive Québec, Enr. 800, rue Alain, #504. Sainte Foy, Quebec. Canada G1X 4E7.
- HABASHI, F. (1980). Principles of Extractive Metallurgy, vol.2, Hydrometallurgy. Gordon and Breach Science publishers, New York.
- HARBEN, P. N. (1996). Bauxite. In: *Industrial Minerals – A Global Geology*, p. 43-50.
- HIGH – TECH. (1998). Ceramics. ETHZ LATSIS SYMPOSIUM.
- HU, Y.; X. LIU, X. e ZHENGHE, X. (2003). Role of cristal structure in flotation separation of diaspore from kaolinite, pyrophyllite and illite. *Minerals Engineering*, vol. 16, p. 219-227.
- LUZ, A. B. (1998). Estudo de Oxidação e Redução de Ferro Contido em Caulins. EPUSP, Tese de Doutorado em Engenharia Mineral.
- MÁRTIRES, R. A. C. (2007) Sumário Mineral DNPM.
- MÁRTIRES, R. A. C. (2004). Alumínio. Sumário Mineral, DNPM.
- McCORMICK, P. G.; PÍCARO, T. e SMITH, P. A. I. (2000). Mechanochemical treatment of high silica bauxite with lime. *Minerals Engineering*, vol. 15, p. 211-214.

- MONTE, M. B. M. e ADAMIAN, R. (1994). Aspectos tecnológicos e econômicos da indústria do alumínio. Série Estudos e Documentos, nº 22,. CETEM.
- PAGIN, S.; CERA, D. e ÉRRICO, J. C. D. (1983). Alumínio do minério ao lingote. In: As usinas brasileiras de metalurgia extrativa dos metais não-ferrosos, ABM, São Paulo.
- HUGLEN, R.; LILLEBUEN, B. e MELLERUD, T. (1996). Principles of electrochemistry and current efficiency. In: Understanding the Hall-Héroult process for production of aluminium, K. Grjotheim and H. Kvande, Editors, Aluminium-Verlag, Düsseldorf.
- RÖHRLICH, M.; MISTRY, M.; RUHRBERG, M. e MARTENS, P. N. (2001). Bauxite mining in Brazil, different viewpoints concerning environmental and sustainable development. VI SMMT/XVIII ENTMM – Rio de Janeiro/Brazil, p. 507-513.
- SEVRYUKOV, N.; KUZMIN, B. e CHELISHCHEV, Y. (1950). General Metallurgy, Peace Publishers, Moscow, 545p.
- SHAFFER, J. W. (1985). Bauxite. In: Mineral Processing Handbook, N. L. Weiss (Editor-in-Chief), Society of Mining Engineers, New York, p. 19/2-19/20.
- YOON, R. H. e SHI, J.(1989). Processing of kaolin clay. In: Samasundaram, P. (Ed.). Advances in Mineral Processing, SME, p. 366-379.
- YOON, R. H. *et al.* (1992). Beneficiation of kaolin clay by froth flotation using hydroxamates collectors. Minerals Engineering, vol. 5, p. 457-467.