



IVO CHAVES SOUZA ALVES

**USO E APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE BAUXITA
NO BRASIL**

Uma revisão sobre perspectivas

São Luís
2021

IVO CHAVES SOUZA ALVES

**USO E APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE BAUXITA
NO BRASIL**

Uma revisão sobre perspectivas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Harvey Alexander Villa-Vélez

São Luís
2021

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Alves, Ivo Chaves Souza.

Uso e aproveitamento dos resíduos de bauxita no Brasil
: uma revisão sobre perspectivas / Ivo Chaves Souza Alves.
- 2021.

182 p.

Orientador(a): Harvey Alexander Villa-Vélez.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, 2021.

1. Lama vermelha. 2. Processos químicos. 3.
Reaproveitamento. 4. Resíduo de bauxita. I. Villa-Vélez,
Harvey Alexander. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA-VÉLEZ
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. LUIS CARLOS ALVES VENANCIO
BiCT/CCET/UFMA

Prof. Dr. WENER MIRANDA TEIXEIRA DOS SANTOS
BiCT/CCET/UFMA

4 de outubro de 2021

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar, agradeço a Deus Pai Todo Poderoso. A ele, toda honra e glória.

Agradeço, também, à Virgem Maria, Santa Mãe de Deus, e aos Santos Arcanjos (São Gabriel, São Miguel e São Rafael) por sempre estarem intercedendo junto a Deus de modo a me auxiliar em minhas necessidades espirituais e temporais.

Agradeço, em especial, a minha mãe e minhas irmãs, por todo tipo de apoio e incentivo dados ao longo de toda minha vida, independente da situação e das circunstâncias.

Agradeço, especialmente, a minha avó materna, por estar sempre ao meu lado, e me dando qualquer apoio e incentivo que eu precise ao longo da minha vida.

Agradeço, também e, em especial, ao meu padrasto Luiz Carlos Benedetti, por todo o apoio dado aos meus estudos ao longo da minha vida, inclusive pelos incentivos especiais dados a mim para trilhar esse caminho de estudo da indústria do alumínio.

Agradeço à minha namorada Elidia Gomes Correa, por estar sempre ao meu lado e me dando apoio e incentivo em qualquer situação em que eu esteja.

Agradeço, também, meus tios, em especial, meu padrinho Rogério Chaves Souza e meu tio Prof. Dr. Renato Chaves Souza, por sempre estarem promovendo momentos de descontração e conversas interessantes, com o meu tio professor sempre me incentivando a trilhar os caminhos da pesquisa científica.

Agradeço, especialmente, meu orientador, o Prof. Dr. Harvey Alexander Villa-Vélez por ter me dado as primeiras oportunidades iniciação científica na minha graduação, além do seu grande apoio e auxílio dados a mim na elaboração deste trabalho.

Agradeço, também, o Prof. Dr. Luis Carlos Alves Venancio pelo seu grande apoio e auxílio na elaboração deste trabalho, especialmente, pelo fornecimento de um exemplar de sua tese de doutorado, tendo este material sido extremamente útil para a elaboração deste trabalho, tornando-se inclusive uma referência para o mesmo.

Agradeço, também, o Prof. Dr. Wener Miranda Teixeira por ter me colocado pela primeira vez em contato com as pesquisas envolvendo o reaproveitamento de resíduos de bauxita, além de ter me dado uma oportunidade para a participação em uma de suas pesquisas.

Agradeço o Prof. Dr. Romildo Martins Sampaio, por todo o apoio prestado durante a elaboração deste trabalho, dando sugestões de correção que ajudaram em muito a melhorar a qualidade deste, além de ter dado indicações de outros professores que poderiam me ajudar nesta empreitada.

Agradeço, em especial, o meu amigo Thonny Yuri Pereira Mineiro, por me ajudar a resolver quaisquer problemas técnicos de informática que impediam e/ou atrasavam a realização deste trabalho.

Agradeço, também, o meu amigo Eng. Demétrio Marques Pereira Júnior, especialmente, por sua trajetória profissional também servir de inspiração para a realização deste trabalho, além de ter estado comigo durante um bom tempo nessa caminhada da graduação.

Por fim, agradeço meus amigos Cairo Rafael Lima Gonçalves, Luis Gustavo Costa Teixeira, Marcel Roane Ferreira de Sousa e Valmichel Vieira da Silva pelos bons momentos vividos, pelas boas conversas e por terem estado bastante tempo comigo durante a graduação.

ALVES, I. C. S. **Uso e aproveitamento dos resíduos de bauxita no Brasil:** uma revisão sobre perspectivas. 2021. 182 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

RESUMO

A cada ano que passa, a lama vermelha tem se tornado um passivo ambiental cada vez mais complexo de se lidar por parte das empresas produtoras de alumina e alumínio, com a sua taxa de reaproveitamento global sendo de, aproximadamente, 4%, mesmo com o com a produção deste efluente aumentando anualmente. Com isso, se faz necessário que haja estudos que mostrem as aplicações da lama vermelha em processos químicos que podem se dar em escala industrial, de modo a valorizar este resíduo como matéria-prima, além de promover uma destinação final a esse resíduo, que não seja o armazenamento em áreas de disposição de resíduos de bauxita (ADRB). Nesse trabalho, é feita uma revisão sistemática de literatura, onde também, é analisado o estado da arte das várias pesquisas que envolvem aplicações dos resíduos de bauxita em áreas de interesse da indústria química, como sistemas de sorção, sistemas catalíticos, síntese de materiais compósitos e extração de metais valiosos e elementos terras raras da lama vermelha. Além disso, os estudos de estado da arte das pesquisas, analisadas neste trabalho, fazem uma abordagem que vai desde os primeiros trabalhos publicados, a respeito do reaproveitamento de resíduos de bauxita, até os trabalhos mais recentes, publicados no ano de 2021. Ademais, também, é realizado neste trabalho um estudo sobre a mineralogia da bauxita e a cadeia de produção do alumínio primário, de modo a determinar como as particularidades do processo produtivo do metal mencionado afetam as características físicas e químicas dos resíduos de bauxita, também abordadas neste trabalho. Por fim, com base no que é mostrado pela literatura revisada neste trabalho, é possível se chegar à conclusão de que, mesmo que ainda não muito aplicados em escala industrial, vários processos desenvolvidos com o objetivo de utilizar resíduos de bauxita como matéria-prima são promissores em termos de aplicação em escala industrial, o que se for concretizado, pode contribuir significativamente para aumentar a taxa de reaproveitamento nesses resíduos industriais, fazendo assim, com que as empresas produtoras de alumina e alumínio tenham menos preocupações com esse passivo ambiental, além de aumentar seus ganhos financeiros ao utilizar resíduos de bauxita em processos químicos que permitem a produção de produtos de maior valor agregado.

Palavras-chave: Lama vermelha, processos químicos, reaproveitamento, resíduo de bauxita.

ALVES, I. C. S. **Uses of bauxite residue in Brazil:** a review over perspectives. 2021. 182 p. Graduate Thesis (Bachelor of Science in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

ABSTRACT

As years pass, red mud has become an increasingly complex environmental liability to be dealt with by aluminum and alumina-producing companies, with its global reuse rate being approximately 4%, even with its production levels increasing annually. That said, it is necessary for studies to be made in order to show applications for red mud on chemical processes can take place on an industrial scale, in such a way that bauxite residue is valorized as a raw material while also giving it a final destination that is not long-term storage on a bauxite residue disposal area (BRDA). In this work, it is made a systematic literature review while the state of the art of the various research works that involve applications of bauxite residues in areas of interest of the chemical industry such as sorption systems, catalytic systems, composite materials synthesis and extraction of valuable metals and rare earth elements from red mud, is also analyzed. Furthermore, the state of the art studies of the research works analyzed in this academic work, have an approach that enables the analysis and discussion of the various works that involve bauxite residue reuse, ranging from the very first to the most recent ones published in the year of 2021. Besides, it is also made in this work, a study of bauxite mineralogy and primary aluminum's production chain, in order to determine how the particularities of the mentioned metal's production process affect the physical and chemical characteristics of bauxite residues discussed in this work. Finally, based on what is shown by the literature reviewed in this work, it is possible to reach the conclusion that even if not applied on an industrial scale, various processes developed with the objective of using bauxite residue as a raw material, are very promising in terms of application on an industrial scale, which if accomplished, may contribute to significantly increase the rate of reuse of this industrial residue, thereby enabling alumina and aluminum-producing companies to have fewer worries about this environmental liability besides increasing financial gains for using bauxite residues in chemical processes that enable production of higher aggregated value products.

Keywords: Bauxite residue, chemical processes, red mud, reuse.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ADRB	Área de Disposição de Resíduos de Bauxita
ANM	Agência Nacional de Mineração
BET	Brunnauer-Emmet -Teller
CNA	Capacidade de Neutralização Ácida
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COVID-19	Doença de coronavírus 2019
CTC	Craqueamento Térmico Catalítico
CTH	Carbonização Hidrotérmica
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EDTA	Ethylenediamine Tetraacetic Acid (Ácido Etilenodiamnio Tetra-acético)
EIA	U.S. Energy Information Administration (Administração de Informação Energética dos EUA)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETR	Elemento(s) Terra(s) Rara(s)
EUA	Estados Unidos da América
FUNAI	Fundação Nacional do Índio
HDC	Hidróxidos Duplos em Camadas
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Biodiversidade
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária

IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
ISE	Institut für seltene Erden und strategische Metallen (Instituto de Elementos Terras Raras e Metais Estratégicos)
JH	Jharkand (estado indiano)
LI	Licença de Instalação
LO	Licença de Operação
LP	Licença Prévia
LV	Lama Vermelha
LVG	Lama Vermelha Granular
LV-Ce	Lama Vermelha Modificada por Cério
LV-PB	Lama Vermelha do Processo Bayer
LV-PS	Lama Vermelha do Processo de Sinterização
MA	Maranhão (estado brasileiro)
MG	Minas Gerais (estado brasileiro)
MPC	Matéria-Prima Crítica
MRS	Metodologia de Resposta de Superfície
NPK	Nitrogênio-Fósforo-Potássio
NT	Northern Territories (estado australiano dos Territórios do Norte)
OR	Orissa (estado indiano)
PA	Pará (estado brasileiro)
PDS	Produto de Dessilicação
PET	Politereftalato de etileno
PF	Perda ao Fogo
pH	Potencial Hidrogeniônico

PLO	Produtos Líquidos Orgânicos
PMMA	Polimetacrilato de metila
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPI	Polipropileno Isotático
PST	Percentual de Sódio Trocável
PVC	Policloreto de Vinila
RB	Resíduo de Bauxita
REDOX	Redutivo e Oxidativo
RNA	Redes Neurais Artificiais
SLVA	Sólido de Lama Vermelha Alumizada
SP	São Paulo (estado brasileiro)
TAS	Taxa de Absorção de Sódio
UP	Uttar Pradesh (estado indiano)
USGS	United States Geological Survey (Serviço de Pesquisa Geológica dos EUA)
WA	Western Australia (estado australiano da Austrália Ocidental)

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino

A	Elemento tetravalente (como Ti, Si, etc.)
c	Coesão
c_c	Índice de compressão
c_v	Coefficiente de adensamento
D_{10}	Diâmetro máximo da fração de partículas 10% mais fina
D_{50}	Diâmetro médio de partícula
D_{90}	Diâmetro mínimo da fração de partículas 10% mais grossa
k	Condutividade hidráulica
M	Metal trivalente (como Al, Fe, etc.)
S_e	Superfície específica
w	Teor de umidade
w_{ot}	Teor de umidade ótimo

Alfabeto grego

γ_d	Peso específico seco
γ_{dmax}	Peso específico seco máximo
φ	Ângulo de atrito interno

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
SUMÁRIO.....	XII
1 INTRODUÇÃO	1
2 JUSTIFICATIVA	5
3 OBJETIVOS	6
3.1 OBJETIVO GERAL.....	6
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
4 METODOLOGIA.....	7
4.1 TIPO DE PESQUISA	7
4.1.1 Quanto à disciplinaridade	7
4.1.2 Quanto à finalidade.....	7
4.1.3 Quanto à abrangência temporal	7
4.1.4 Quanto aos objetivos	8
4.1.5 Quanto à forma de abordagem	8
4.1.6 Quanto aos procedimentos	8
4.1.7 Quanto ao local.....	8
4.1.8 Quanto à procedência dos dados	8
4.2 FORMA DE CONDUÇÃO DA PESQUISA	9
5 MINERALOGIA DA BAUXITA	9
6 CADEIA DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO	14
6.1 ETAPAS	14
6.2 MINERAÇÃO	14
6.3 RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE BAUXITA	15
6.4 REFINO.....	15
6.5 RESÍDUOS DO REFINO DE BAUXITA	16

6.6	REDUÇÃO.....	16
7	VISÃO GERAL DOS PROCESSOS DE REFINO DE BAUXITA	18
7.1	HISTÓRICO.....	18
7.2	VISÃO GERAL DO PROCESSO BAYER.....	22
7.2.1	Seleção do tipo de bauxita a ser utilizado.....	22
7.2.2	Etapas do Processo Bayer.....	25
7.2.3	Moagem e dissolução da bauxita em soda cáustica.....	26
7.2.4	Dessilicação	26
7.2.5	Digestão.....	27
7.2.6	Clarificação.....	29
7.2.7	Precipitação	30
7.2.8	Calcinação	31
7.3	FORMAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE BAUXITA.....	32
7.3.1	Disposição em alto mar	32
7.3.2	Disposição em lagoas	32
7.3.3	Empilhamento a seco.....	33
7.3.4	Disposição a seco	35
8	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS RESÍDUOS DE BAUXITA	36
8.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	36
8.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	37
8.2.1	Distribuição de tamanho de partícula	37
8.2.2	Densidade	45
8.2.3	Superfície específica (S_e).....	47
8.2.4	Peso específico seco (γ_d) e teor de umidade (w)	48
8.2.5	Índice de compressão (c_c) e coeficiente de adensamento (c_v).....	51
8.2.6	Condutividade hidráulica (k).....	55
8.2.7	Coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ).....	57
8.3	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	60
8.3.1	pH.....	60
8.3.2	Capacidade de neutralização ácida (CNA).....	63
8.3.3	Composição química	66
8.3.4	Salinidade	71

9	APLICAÇÕES DOS RESÍDUOS DE BAUXITA NA INDÚSTRIA QUÍMICA	72
9.1	ABSORÇÃO E ADSORÇÃO	72
9.1.1	Considerações gerais	72
9.1.2	Zeólitas	73
9.1.3	Resíduos de bauxita como sorventes	80
9.2	MATERIAIS COMPÓSITOS	91
9.2.1	Considerações gerais	91
9.2.2	Revisão dos estudos conduzidos ao redor do mundo	92
9.2.3	Revisão dos estudos conduzidos no Brasil	97
9.3	CATÁLISE	103
9.3.1	Considerações gerais	103
9.3.2	Revisão dos usos da lama vermelha como catalisador	104
9.4	EXTRAÇÃO DE ELEMENTOS TERRAS RARAS (ETR) E OUTROS METAIS VALIOSOS	109
10	IMPORTÂNCIA DO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE BAUXITA	121
10.1	IMPORTÂNCIA AMBIENTAL	121
10.2	IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA	125
10.3	INCENTIVO À CRIAÇÃO DE INDÚSTRIAS PARALELAS	128
11	CONCLUSÃO	129
12	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	132
	REFERÊNCIAS	133

1 INTRODUÇÃO

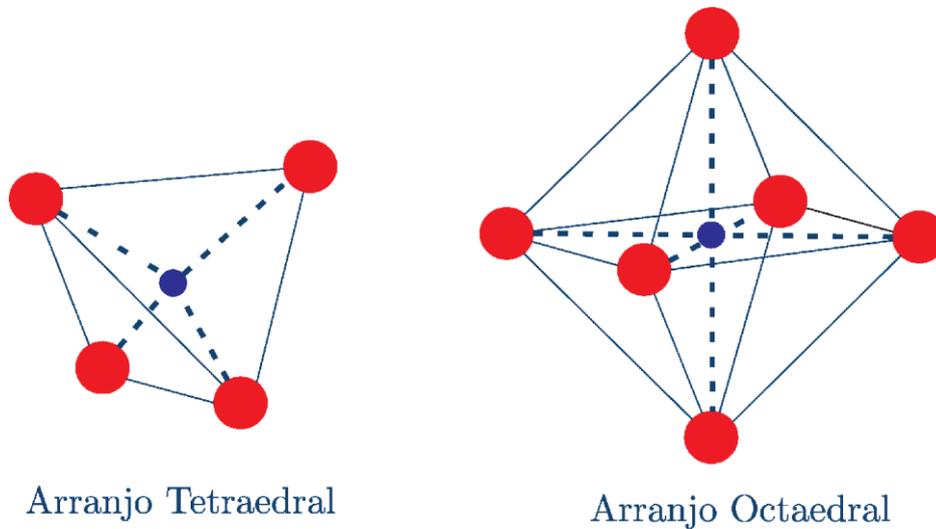
Dentre os materiais da crosta terrestre, o alumínio é o metal mais abundante, representando 8% em massa dessa camada, sendo também, o terceiro elemento mais abundante, perdendo apenas para o oxigênio e o silício. A palavra *alumínio* deriva da palavra em latim *alumen*, nome dado a um dos seus sais, o sulfato de alumínio que já era conhecido desde a Antiguidade, sendo empregado então, como fixador de corantes em tecidos (PEIXOTO, 2001). Segundo Peixoto (2001), há mais de 7000 anos atrás, povos da antiga Mesopotâmia já produziam cerâmicas de qualidade contendo um alto teor de alumínio, sendo que há 4000 anos, os egípcios e babilônios usavam compostos de alumínio como ingrediente no preparo de vários produtos químicos e medicinais.

O alumínio é um elemento de número atômico 13 e de massa atômica molar igual a 26,9815 g/mol (PEIXOTO, 2001). É bastante utilizado em diversos setores da indústria, principalmente por conta de propriedades como baixa massa específica e alta resistência a corrosão, quando comparado a outros metais (FORTUNA *et al.*, 2012). Além disso, o alumínio também possui outras características físico-químicas de grande relevância para a indústria tais como alta leveza, alta maleabilidade, alta ductilidade e excelente durabilidade (FONSECA, 2018).

As aplicações do alumínio demonstram bem a sua importância econômica para o mundo nos dias atuais. De acordo com Fortuna *et al.* (2012), o alumínio possui aplicações em vários setores da indústria, com destaque para as áreas de transporte e construção civil, fabricação de equipamentos elétricos e transmissão de energia. Além disso, segundo Constantino *et al.* (2002), o alumínio também é empregado na fabricação de móveis, eletrodomésticos, brinquedos, utensílios de cozinha, latas e produtos farmacêuticos.

O alumínio não é encontrado diretamente em seu estado metálico na crosta terrestre (ABAL, 2019). É naturalmente encontrado no estado de oxidação +3, e comumente coordenado com o oxigênio em arranjos octaédricos, formados por 6 ligações, ou tetraédricos, formados por 4 ligações (FONSECA, 2018).

Além disso, o alumínio compõe minerais de todas as classes, sendo este o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre (FONSECA, 2018). Dentre os minerais formados pelo alumínio, destacam-se os silicatos, óxidos e hidróxidos de alumínio, sendo importante ressaltar que o alumínio não ocorre naturalmente em seu estado elementar (KLEIN; DUTROW, 2012).



Arranjo Tetraedral

Arranjo Octaedral

Figura 1 – Arranjos das ligações do alumínio. Fonte: FONSECA, 2018, p. 3.

Segundo Fortuna *et al.* (2012), é o minério de maior importância industrial para a obtenção de muitos compostos de alumínio e do alumínio metálico. A bauxita é encontrada em regiões do planeta cujos climas pertencem a pelo menos um dos três seguintes grupos climáticos: Mediterrâneo, Tropical e Subtropical (ABAL, 2019). Além disso, também, é importante ressaltar que a bauxita é formada por ação do intemperismo de aluminossilicatos, que causa alteração de rochas aluminosas em regiões de clima tropical e subtropical (FORTUNA *et al.*, 2012; VILLAR, 2002).

A bauxita é uma rocha de coloração avermelhada, rica em alumínio, que contém, em média, cerca de 40% de alumina (SAMPAIO *et al.*, 2008). Seu nome é derivado da localidade onde foi descoberta que é Les Baux, no sul da França, tendo sido identificada pela primeira vez pelo geólogo Pierre Berthier, no ano de 1821 (VILLAR, 2002).

Além disso, Oliveira (2011) destaca que a descoberta da bauxita é um fato que ocorreu antes mesmo do conhecimento do próprio elemento químico alumínio, que só viria a ser reconhecido como elemento químico, no ano de 1825, por Hans Christian Oersted, com Sampaio *et al.* (2008) explicitando, da forma mostrada a seguir, as principais formas de bauxita encontradas na natureza, além da influência do teor de óxidos de ferro na coloração do minério.

A coloração da bauxita depende da proporção de óxidos de ferro presentes na rocha, sendo que a bauxita branca possui de 2% a 5% de óxidos de ferro, ao passo que na

bauxita vermelha, essa proporção pode atingir os 25%. A bauxita é uma rocha que consiste em uma mistura de minerais de alumínio, sendo os mais importantes a gibbsita $[Al(OH)_3]$, o diásporo $[\alpha-AlO(OH)]$ e a boehmita $[\gamma-AlO(OH)]$. Esses minerais são conhecidos como oxi-hidróxidos de alumínio e, suas proporções na rocha variam muito entre os depósitos, assim como os tipos e as impurezas presentes no minério, tais como óxidos de ferro, argila, sílica, dióxido de titânio, entre outras. (SAMPAIO *et al.*, 2008)

Para que a produção de alumínio primário seja economicamente viável, a bauxita deve apresentar, no mínimo, 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3) em sua composição (ABAL, 2019). Segundo Sampaio *et al.* (2008), a maioria das bauxitas economicamente aproveitáveis possuem um teor de Al_2O_3 entre 50% e 55%.

As reservas de bauxita brasileiras, além de produzirem minério de ótima qualidade, estão entre as maiores do mundo (ABAL, 2019). Mártires (2009) destaca que as bauxitas produzidas nessas reservas possuem características químicas que se enquadram nos padrões mundiais exigidos pelo mercado, tanto para grau metalúrgico, quanto para grau não-metalúrgico, o que significa dizer que são excelentes reservas para o padrão internacional.

De acordo com o DNPM (2010), no Brasil, há predominância das reservas de bauxita de grau metalúrgico, que representam 90,75% das reservas de bauxita brasileiras, com os outros 9,25% sendo representados pelas reservas de bauxita não-metalúrgica. Segundo Sampaio *et al.* (2008), as bauxitas metalúrgicas compreendem a principal matéria-prima utilizada na cadeia de produção primária do alumínio, possibilitando que sua extração a partir do minério seja economicamente viável. De acordo com a ABAL (2019), a cadeia de produção primária do alumínio compreende três fases: mineração da bauxita, refino da bauxita para fins de conversão do minério (óxido de alumínio impuro, em alumina ou o óxido de alumínio puro) e redução da alumina a alumínio metálico.

Durante o beneficiamento primário que ocorre na mineração da bauxita e o refino deste minério para fins de sua conversão em alumina, ocorre a geração de resíduos de bauxita, sendo que segundo a ABAL (2019), os resíduos decorrentes do refino da bauxita são direcionados para Áreas de Deposição de Resíduos de Bauxita (ADRB), que são licenciadas pelos órgãos ambientais competentes, projetadas e construídas para atender aos melhores padrões da indústria. Além disso, segundo a entidade supracitada (2019), nesse caso, após sucessivas

lavagens e filtragens no interior da refinaria, a água proveniente das ADRB, ainda com traços de alcalinidade, volta para o processo.

Segundo Reddy *et al.* (2021), atualmente, uma das questões ambientais críticas, no processamento da bauxita, envolve os resíduos gerados durante sua digestão com hidróxido de sódio, no processo de refino, para fins de conversão deste minério em alumina. O termo “lama vermelha” é usualmente utilizado como sinônimo para os RB gerados nesta etapa da cadeia de produção primária do alumínio.

Estudos realizados por potências mundiais como os EUA, o Canadá, a UE e o Japão identificaram elementos considerados estrategicamente importantes para as suas economias, sendo estes conhecidos como matérias-primas críticas ou MPC (UJACZKI *et al.*, 2019). Segundo Hennebel *et al.* (2015), as MPC são definidas como materiais com alto risco de abastecimento e de importância econômica acima da média quando comparadas a outras matérias-primas. Ujaczki *et al.* (2018) afirmaram que uma medida para reduzir o risco de abastecimento de MPC é a utilização de fontes primárias e secundárias ainda não exploradas de matérias-primas desse tipo. Nesse sentido, Ujaczki *et al.* (2018) e Liu e Naidu (2014), defendem que resíduos de bauxita constituem uma fonte potencial de MPC, que pode conter altos níveis de metais estrategicamente importantes, a depender da origem geológica e do processamento da bauxita originária.

Segundo Reddy *et al.* (2021), a presença de resíduos de bauxita, assim como qualquer outro tipo de resíduo ou subproduto tóxico de processos industriais, representa uma séria ameaça para a água, a terra e a atmosfera das áreas no entorno de depósitos de RB, uma vez que além do risco de haver poluição e contaminação desses elementos ambientais tão valiosos, ainda há o risco da ocorrência de acidentes com as barragens desses depósitos, que podem levar a não só a poluição e contaminação do ar, da água e de terras no entorno da ADRB afetada, como também, a perda de vidas humanas e da qualidade de vida das comunidades no entorno.

Dessa forma, Reddy *et al.* (2021), defendem que, no contexto das consequências ambientais potencialmente sérias da lama vermelha e, também, diante da necessidade de se economizar e conservar recursos naturais, a exploração deste tipo de resíduo se torna indispensável. Segundo os mesmos autores, com o aumento da geração de lama vermelha, gerado pelo aumento mundial da produção de alumina, que se dá ano após ano, por conta da evolução dos processos de refino de bauxita e da evolução das técnicas de empilhamento a seco de RB, a exploração de novas aplicações para esses resíduos tornou-se uma prioridade mundial.

De acordo com Lazou *et al.* (2021), várias pesquisas que buscam novas formas de aplicações para os resíduos de bauxita, agregando-lhes valor, têm sido feitas nos últimos anos. Segundo Reddy *et al.* (2021), vários desses estudos anteriores provaram que RB podem ser utilizados de forma benéfica em projetos de infraestrutura, ou seja, como material estrutural em projetos de construção civil. Contudo, Lazou *et al.* (2021) pontuam que os resultados das pesquisas voltadas para a busca de novas formas de reaproveitamento de resíduos de bauxita ainda não atingiram a aplicação em escala industrial, muito por conta de entraves econômicos, o que torna a valorização dos resíduos de bauxita como matéria-prima crítica algo desafiador, ainda que promissor.

2 JUSTIFICATIVA

A lama vermelha, efluente resultante dos processos de refino de bauxita, tem se tornado um passivo ambiental cada vez mais complexo de se lidar por parte das empresas produtoras de alumina e alumínio. No entanto, muitos estudos demonstram que este material pode ser empregado como matéria-prima crítica para extração de metais a partir de suas impurezas, bem como utilizado em várias aplicações, especialmente na construção civil. Assim, é importante que as pesquisas e os trabalhos desenvolvidos possam demonstrar ou reunir em um só lugar as diversas aplicações possíveis para este tipo de resíduo, para que dessa forma as empresas que lidam com os mesmos possam ter uma referência que sirva como base para a elaboração de suas políticas de destinação final desses resíduos, incluindo formas de como essas empresas podem re-aproveitar esses resíduos e agregar valor aos mesmos.

Além disso, segundo Silva Filho *et al.* (2007), no Brasil, dados publicados sobre a geração de lama vermelha são praticamente inexistentes, sendo esta uma realidade que perdura até os dias de hoje. Dessa forma, se faz necessário que haja trabalhos que disponibilizem esse tipo de dado, para que assim, tanto a academia, quanto a indústria, possam ter uma ideia melhor da quantidade de resíduos produzida por cada refinaria de bauxita existente no Brasil, além da quantidade média de resíduos de refino de bauxita gerada anualmente em território nacional, permitindo estimular futuras aplicações, diminuir o passivo ambiental causado pelo seu não aproveitamento e estimar possíveis receitas das suas aplicações e uso.

Ademais, Reddy *et al.* (2021) apontaram que a maioria dos estudos feitos sobre reaproveitamento da lama vermelha são desconexos, com a caracterização destes resíduos a fim de agregar valor aos mesmos ainda sendo feita de forma inadequada. No Brasil, a realidade é ainda mais crítica, haja visto que além de prevalecer a realidade apontada no resto do mundo, os grandes estudos de revisão bibliográfica sobre reaproveitamento de resíduos de bauxita, publicados em Língua Portuguesa, já estão com seus dados bastante desatualizados, dado que possuem mais de dez anos de publicação, o que também, faz com que seja importante que haja estudos de revisão bibliográfica sobre o reaproveitamento de lama vermelha que tragam dados e informações mais atualizadas, de modo a servir como referência para atividades pesquisa e desenvolvimento nessa área de interesse.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

- Estudar, a partir de uma revisão ampla e criteriosa da literatura, possíveis aplicações dos resíduos provenientes do refino de bauxita em áreas afins à Engenharia Química.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o Processo Bayer e sua influência na geração de resíduos de bauxita produzidos na rota de extração de alumina;
- Apresentar, com base no que está descrito na literatura as propriedades físicas e químicas da bauxita;
- Descrever as aplicações dos resíduos de bauxita em processos de sorção, catálise química e extração de elementos terras raras e outros metais valiosos contidos nesses resíduos;
- Avaliar os principais impactos econômicos e ambientais das possíveis aplicações para os resíduos provenientes do refino da bauxita.

4 METODOLOGIA

4.1 TIPO DE PESQUISA

Nas seguintes subseções deste trabalho, foram apresentados os tópicos de pesquisa nos quais a pesquisa originária deste trabalho se enquadra, de acordo com o sistema de classificação de trabalhos científicos vigente, apresentado por Gil (2017), Marconi e Lakatos (2017) e, resumido por Bottentuit Júnior (2019).

4.1.1 Quanto à disciplinaridade

Este trabalho é considerado como um trabalho interdisciplinar, dado que é baseado em uma relação entre conhecimentos pertencentes a duas grandes áreas de conhecimento do CNPq, sendo estas as Ciências Exatas e da Terra e as Engenharias.

4.1.2 Quanto à finalidade

Este trabalho pode ser considerado como uma monografia resultante de uma pesquisa aplicada, visto que é resultante de uma pesquisa onde foi feita uma exploração exaustiva de um assunto específico, investigado cientificamente, e voltada à aquisição de conhecimentos com vistas à aplicação em uma situação específica (AMADEU *et al.*, 2017; GIL, 2017).

4.1.3 Quanto à abrangência temporal

Este trabalho é caracterizado como uma monografia resultante de uma pesquisa de cunho longitudinal, pois o estudo de revisão bibliográfica que deu origem a este trabalho foi conduzido ao longo de um período maior de tempo, sendo este um período de seis a nove meses. Segundo Marconi e Lakatos (2017), pesquisas de cunho longitudinal possuem a vantagem de não só refletir nos seus trabalhos resultantes as informações constantes na literatura publicada anteriormente à escrita destes trabalhos, como também, poder refletir nestes as mudanças observadas ao longo do tempo de execução da pesquisa.

4.1.4 Quanto aos objetivos

Devido ao fato de a pesquisa originária desta monografia buscar proporcionar um maior entendimento do cenário e das perspectivas do aproveitamento de resíduos de bauxita no Brasil e no mundo, a pesquisa originária deste trabalho pode ser considerada como uma pesquisa de caráter exploratório.

4.1.5 Quanto à forma de abordagem

Como este trabalho de revisão de literatura busca compreender um problema específico, com um maior aprofundamento no tema de sua pesquisa originária, trabalhando com descrições, comparações e interpretações, é correto afirmar que a pesquisa que originou esta monografia é uma pesquisa de cunho qualitativo.

4.1.6 Quanto aos procedimentos

A pesquisa originária deste trabalho de revisão de literatura é considerada uma pesquisa bibliográfica, uma vez que recupera o conhecimento científico acumulado acerca de um determinado tema, através da consulta e citação de textos científicos.

4.1.7 Quanto ao local

Por conta de a pesquisa originária desta monografia ter sido realizada em um ambiente controlado, esta foi classificada como uma pesquisa de laboratório.

4.1.8 Quanto à procedência dos dados

Por conta de os dados mostrados nesta monografia, nos quais a pesquisa originária deste trabalho se baseou para a elaboração do mesmo, terem se originado na literatura científica citada neste trabalho, ou seja, serem originados de materiais já tratados, processados e analisados por outros autores, esta pesquisa foi classificada como uma pesquisa baseada em dados secundários.

4.2 FORMA DE CONDUÇÃO DA PESQUISA

Esta monografia será produzida fazendo-se uso de uma metodologia híbrida de construção de trabalhos de revisão de literatura, pois durante a pesquisa feita para a elaboração deste trabalho, será feita uma revisão sistemática de literatura, combinada com um estudo do estado da arte da literatura científica disponível sobre o tema de aproveitamento de resíduos de bauxita, a fim de se fazer uma síntese criteriosa das evidências científicas disponíveis acerca desse tema, buscando também, compreender tais evidências, além de apontar as perspectivas futuras para o aproveitamento da lama vermelha gerada durante o refino da bauxita.

5 MINERALOGIA DA BAUXITA

Conforme visto na primeira seção deste trabalho, é correto inferir que as propriedades físicas e químicas dos resíduos de bauxita irão variar de acordo com a jazida de onde foi extraída a bauxita utilizada no processo de produção de alumínio primário, o que faz com que seja necessário que haja um maior entendimento acerca da mineralogia da bauxita. Primeiramente, de acordo com Fonseca (2018), é sabido que os minerais aluminosos estão presentes em todos os tipos de rochas, sejam estas ígneas, sedimentares, ou metamórficas, bem como em todos os solos, sendo que neste ambiente, a concentração de Al varia em função do material originário e do pH do solo em questão.

Os minerais hospedeiros de alumínio mais abundantes são os feldspatos, as micas e os argilominerais (FONSECA, 2018). A extração do Al só é economicamente viável a partir de seus oxí-hidróxidos que são a gibbsita $[Al(OH)_3]$, o diásporo $[\alpha-AlO(OH)]$ e a boehmita $[\gamma-AlO(OH)]$ (KLEIN; DUTROW, 2012). A presença de diásporo não é desejada em bauxitas metalúrgicas, pois este oxí-hidróxido de alumínio exige uma temperatura muito mais elevada para que ocorra sua solubilização (ARENARE, 2008). Além disso, Fonseca (2018) descreve da seguinte forma a ocorrência natural da boehmita.

A boehmita é a forma de $AlO(OH)$ mais comum em bauxitas da região do Mediterrâneo, sendo que esta ocorre junto com a gibbsita em depósitos cujas origens remontam do período Terciário ao período Cretáceo Superior. Em muitas bauxitas provenientes de camadas de solo mais antigas, cujas origens remontam aos primórdios

da Era Mesozóica, a boehmita é o único oxi-hidróxido de alumínio presente, contendo o sistema cristalino ortorrômbico, podendo ainda, apresentar hábito tabular, porém, ocorrendo comumente, em agregados pisolíticos e maciços. (FONSECA, 2018)

Além disso, Fonseca (2018) e Wefers e Misra (1987) descreveram a estrutura cristalina da boehmita como camadas duplas com o oxigênio em empacotamento cúbico, sendo que essas camadas são compostas por cadeias de moléculas de $\text{AlO}(\text{OH})$. De acordo com Fonseca (2018), as moléculas de hidroxila de uma das camadas ocupam o vazio entre os íons OH^- de camadas adjacentes, sendo que as camadas duplas interagem entre si através de ligações de hidrogênio entre os íons de hidroxila. A estrutura cristalina e o empacotamento da boehmita são mostrados, a seguir, na Figura 2.

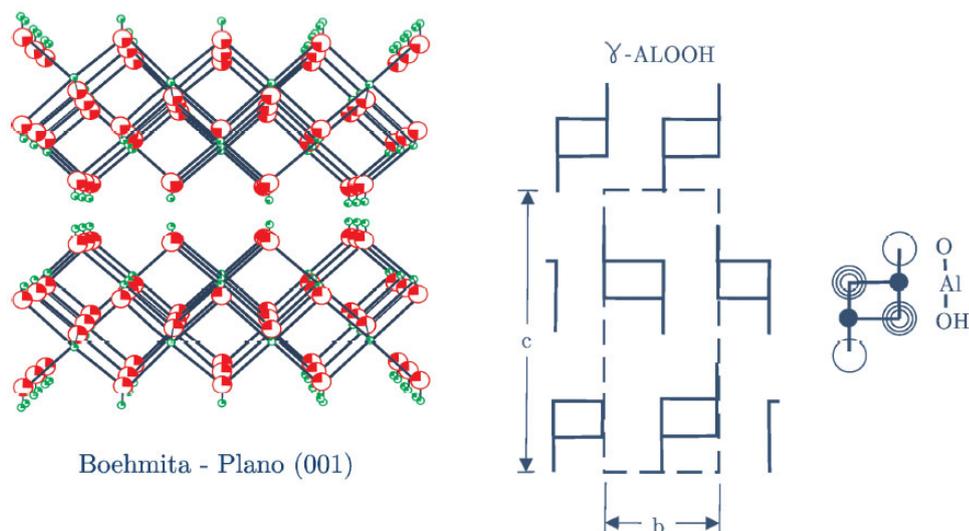


Figura 2 – Estrutura e visualização do empacotamento da boehmita. Fonte: FONSECA, 2018, p.4.

Fonseca (2018) afirma que o diásporo é um mineral dimorfo da boehmita, que ocorre em argilas aluminosas, como seu constituinte majoritário, sendo que este tipo de solo é formado a partir de rochas aluminosas e ocorre predominantemente no Leste Europeu, em países como Grécia, Romênia e Rússia (parte europeia). Além disso, Wefers e Misra (1987) destacam que este mineral foi identificado, também, em folhelhos aluminosos chineses como um mineral metamórfico. De acordo com Fonseca (2018), a associação do diásporo com depósitos minerais

européus mais antigos e rochas metamorfozadas mostra que sua formação admite temperaturas e pressões mais elevadas. Além disso, Fonseca (2018) descreve da seguinte forma a estrutura cristalina e o empacotamento do diásporo, conforme mostrado na Figura 3.

Assim como a boehmita, o diásporo pertence ao sistema cristalino ortorrômbico, com o elemento básico de sua estrutura cristalina sendo as cadeias duplas. O que diferencia os dois minerais é o empacotamento praticamente hexagonal do diásporo. (FONSECA, 2018)

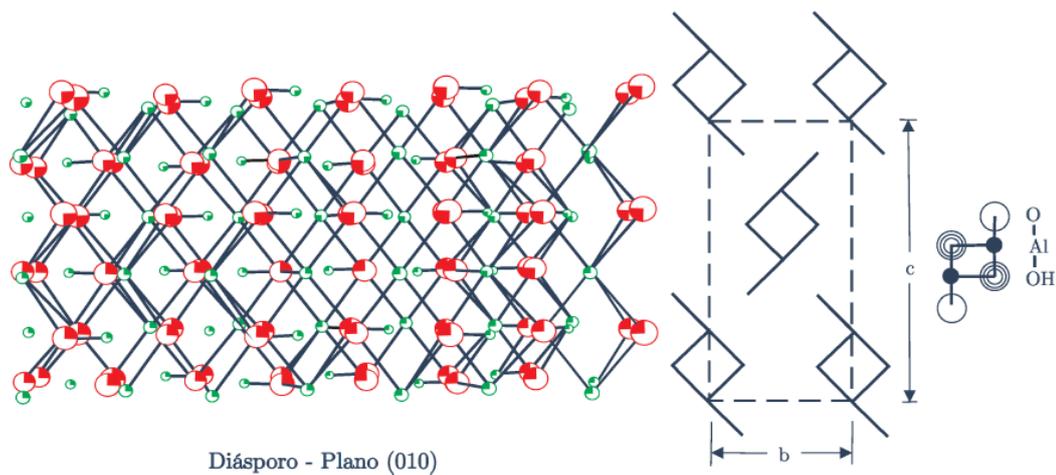


Figura 3 – Estrutura e visualização do empacotamento do diásporo. Fonte: FONSECA, 2018, p. 5.

Em se tratando da gibbsita, Fonseca (2018) descreve da seguinte maneira a ocorrência natural dessa forma de bauxita, além de estabelecer uma relação entre a ocorrência natural da gibbsita e as origens dos depósitos desse minério.

A gibbsita, por sua vez, é o principal mineral componente da bauxita em regiões tropicais, incluindo o Brasil, sendo registradas também, algumas ocorrências importantes deste mineral aluminoso na América do Norte e na Europa, sendo que este mineral está predominantemente, mas não exclusivamente, associado a depósitos minerais originados entre o Período Terciário e a atualidade. (FONSECA, 2018)

De acordo com Fonseca (2018), o sistema cristalográfico da gibbsita é monoclinico, sendo que o seu hábito natural é usualmente pseudo-hexagonal tabular. Ademais, a estrutura cristalina da gibbsita é formada por duplas camadas de íons OH^- , com cátions de alumínio ocupando dois terços dos interstícios (WEFERS e MISRA, 1987; FONSECA, 2018). Segundo Fonseca (2018), na estrutura cristalina da gibbsita, os grupos de hidroxilas se alinham uns com os outros acima e abaixo, porém não no menor empacotamento possível, sendo que na estrutura cristalina deste mineral aluminoso, as folhas estão quase sempre associadas duas a duas. Na Figura 4, a seguir, são mostrados a estrutura cristalina e o empacotamento da gibbsita.

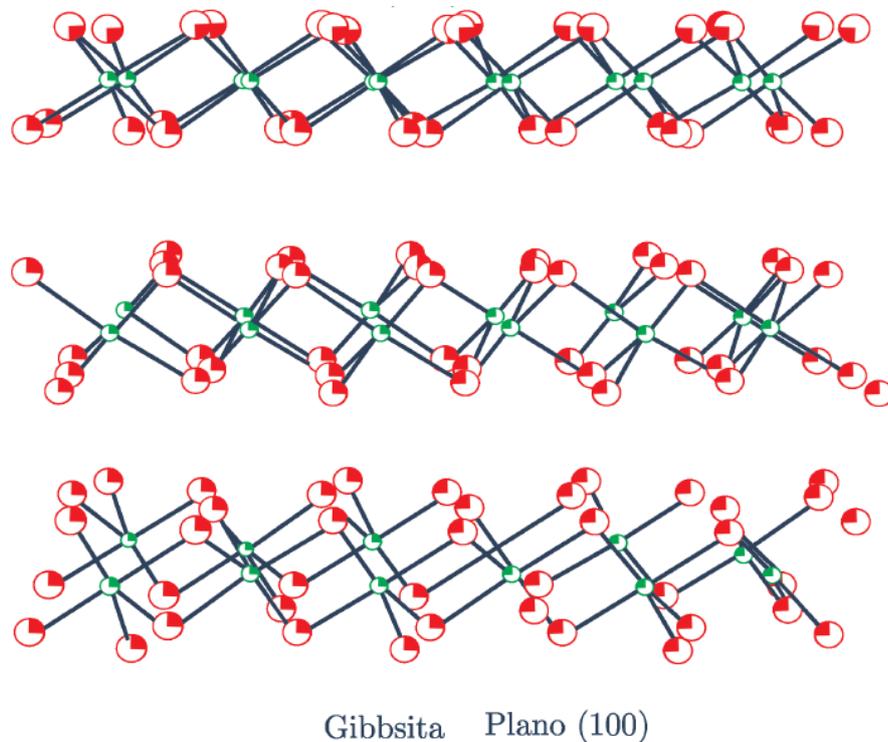


Figura 4 – Estrutura e visualização do empacotamento da gibbsita. Fonte: FONSECA, 2018, p. 5.

Fonseca (2018), também destaca que, além da gibbsita, existem também, outras formas raras de oxi-hidróxidos de alumínio trihidratados, que são a nordstranita, identificada inicialmente na Jamaica, e a bayerita, sendo esta produzida artificialmente, com estas formas raras de minerais aluminosos se diferenciando pelo número de camadas duplas ligadas, conforme mostrado, a seguir, na Figura 5.

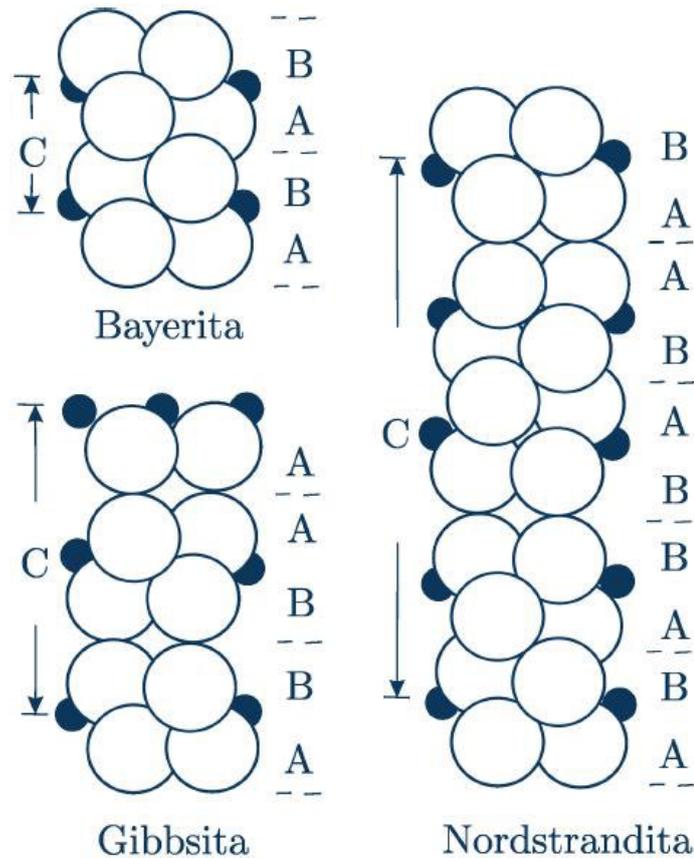


Figura 5 – Comparação da estrutura e do empacotamento dos minerais trihidratados de alumínio. Fonte: FONSECA, 2018, p. 6.

No Brasil, a nordstranita foi identificada unicamente no município de Lages, em Santa Catarina, sendo associada a rochas fonolíticas, ocorrendo na região por conta de condições muito particulares do arcabouço geológico da área (FONSECA, 2018; DANI *et al.*, 2001). De acordo com Fonseca (2018), a interação restrita de água meteórica com o feldspato alcalino da rocha hospedeira teria sido capaz de promover o enriquecimento do fluido em álcalis, tornando o pH extremamente básico, condição esta que é necessária para a formação da nordstranita.

Atualmente, utiliza-se a nomenclatura de bauxita trihidratada quando o minério de alumínio é composto basicamente por gibbsita e apresenta, no máximo, 2% de boehmita (FONSECA, 2018). As bauxitas monohidratadas são compostas principalmente por boehmita e as bauxitas mistas são constituídas majoritariamente por gibbsita, podendo apresentar, no entanto, mais de 2% de boehmita (ARENARE, 2008).

6 CADEIA DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO

6.1 ETAPAS

O alumínio não é encontrado diretamente na crosta terrestre, sendo a sua obtenção feita em três etapas, que começam na **Mineração**, seguindo para as duas etapas posteriores que são o **Refino** e a **Redução** (ABAL, 2019). As etapas da cadeia de produção do alumínio primário são enumeradas de forma ordenada e descritas de forma detalhada na lista a seguir.

1. **Mineração** da bauxita;
2. **Refino** da bauxita;
3. **Redução** eletrolítica da alumina em alumínio primário.

Dentre as etapas da cadeia de produção do alumínio primário, duas delas são conhecidas por gerarem resíduos de bauxita ao seu final, que são as etapas de mineração e refino, sendo que os resíduos gerados ao final destas etapas são conhecidos, respectivamente, como resíduos de mineração de bauxita e resíduos do refino de bauxita (também conhecidos como lama vermelha ou LV).

6.2 MINERAÇÃO

De acordo com a ABAL (2019), esta etapa da cadeia de produção do alumínio primário se inicia com a remoção planejada da vegetação e do solo orgânico que são dados antes do início das operações da mina de bauxita, a fim de que se tenha um melhor acesso aos depósitos subterrâneos desse minério.

Feito isso, procede-se para a retirada das camadas superficiais de solo que são as argilas e lateritas para se ter acesso aos depósitos de bauxita e, assim, proceder-se à extração deste minério de suas reservas subterrâneas (ABAL, 2019).

Segundo a ABAL (2019), após a extração da bauxita do solo, dá-se início ao beneficiamento do minério, que consiste em três etapas, sendo estas:

1. **Britagem** para redução da granulometria do minério;
2. **Lavagem** do minério com água para reduzir (quando necessário) o teor de sílica contido nas parcelas de granulometria mais fina;

3. **Secagem** do minério beneficiado.

6.3 RESÍDUOS DA MINERAÇÃO DE BAUXITA

Segundo a ABAL (2019), na etapa primária do beneficiamento da bauxita, o único resíduo proveniente da lavagem do minério é a argila, sem qualquer aditivo químico, sendo que nos depósitos desses resíduos, estes são compactados e parte da água é recuperada no processo de beneficiamento da bauxita. Com isso, o risco de vazamento de barragens é reduzido por conta da diminuição da quantidade de resíduos de mineração em estoque, por conta da reutilização contínua desses resíduos. Além disso, de acordo com a ABAL (2019), com o tempo, a argila proveniente do beneficiamento da bauxita sedimenta e seca nos reservatórios, sendo que a água residual vai sendo eliminada até que haja condições para o replantio da vegetação sobre o depósito, o que possibilita a reintegração ao meio ambiente da área de mina explorada.

6.4 REFINO

Nesta etapa da cadeia de produção do alumínio primário, ocorre a transformação do óxido de alumínio presente na bauxita para a sua forma mais pura, a alumina. Além de ser insumo para a produção do alumínio primário, a alumina resultante do processo de refino da bauxita também possui diversas aplicações (ABAL, 2019). Segundo a ABAL (2019), estas aplicações incluem fabricação de materiais refratários, tratamento de água, uso em produtos abrasivos e para polimento, como retardante de chamas, uso na fabricação de velas de ignição, etc. Ademais, Tabereaux e Peterson (2014) explicitam da seguinte forma quais são os dois processos mais utilizados atualmente, em escala industrial para a realização do refino da bauxita.

Atualmente, existem dois processos que podem ser usados para o refino da bauxita, sendo estes o Processo Bayer e o Processo de Sinterização, sendo este último, caracterizado pela sinterização da bauxita com soda (Na_2CO_3) e calcário (CaCO_3). A escolha do processo de refino de bauxita a ser adotado pela empresa produtora de alumina irá depender da mineralogia deste minério, sendo que os pormenores dos processos mencionados nesta seção serão abordados nos próximos capítulos deste trabalho. (TABEREAUX; PETERSON, 2014)

6.5 RESÍDUOS DO REFINO DE BAUXITA

De acordo com Gräfe *et al.* (2011), durante a etapa de refino da bauxita, visando a conversão deste minério em alumina, ocorre a produção de resíduos que são altamente alcalinos, por conta do uso do hidróxido de sódio para a extração do hidrato de alumínio $[Al(OH)_3]$ nesta etapa da cadeia de produção do alumínio primário, sendo que além disso, estes resíduos possuem concentrações consideráveis de metais pesados, sendo estes, metais que estavam presentes como impurezas na bauxita.

Segundo a ABAL (2019), os resíduos provenientes do refino de bauxita são direcionados para as Áreas de Disposição de Resíduos de Bauxita (ADRB) que são depósitos de LV licenciados pelos órgãos ambientais competentes, projetados e construídos para atender aos melhores padrões de segurança da indústria, sendo que nesse caso, após sucessivas lavagens e filtrações, a água depositada nas ADRB, ainda com traços de alcalinidade, volta para o processo de refino.

Por fim, é importante frisar que nos depósitos de resíduos, tanto de mineração, quanto de refino de bauxita, a água acumulada aumenta o risco de vazamento das barragens (ABAL, 2019). Por esta razão, segundo a ABAL (2019), além de reaproveitar no processo de refino da bauxita a água proveniente dos resíduos deste processo, várias empresas atualmente adotam ou buscam adotar práticas de estocagem que visam uma maior redução de umidade desses resíduos, o que permitirá com que estes sejam melhor compactados nas ADRB.

Além disso, Power *et al.* (2011) e Miura (2016) apontam que outro benefício da redução de umidade desses resíduos é o fato de haver uma consolidação mais rápida destes em sua forma sólida, o que permite com que seja feita tão quanto seja possível a revegetação da superfície do depósito de resíduos de refino de bauxita, o que tornará possível uma reintegração mais rápida da área ao meio ambiente da região.

6.6 REDUÇÃO

A obtenção do alumínio ocorre pela redução da alumina em cubas eletrolíticas, a altas temperaturas, no processo conhecido como Hall-Héroult (ABAL, 2019). Segundo a ABAL (2019), geralmente, são necessárias duas toneladas de alumina para produzir uma tonelada de

alumínio metálico pelo processo de redução eletrolítica. A estrutura das cubas de produção de alumínio metálico e o fluxo do Processo Hall-Héroult são mostrados nas Figuras 6 e 7.

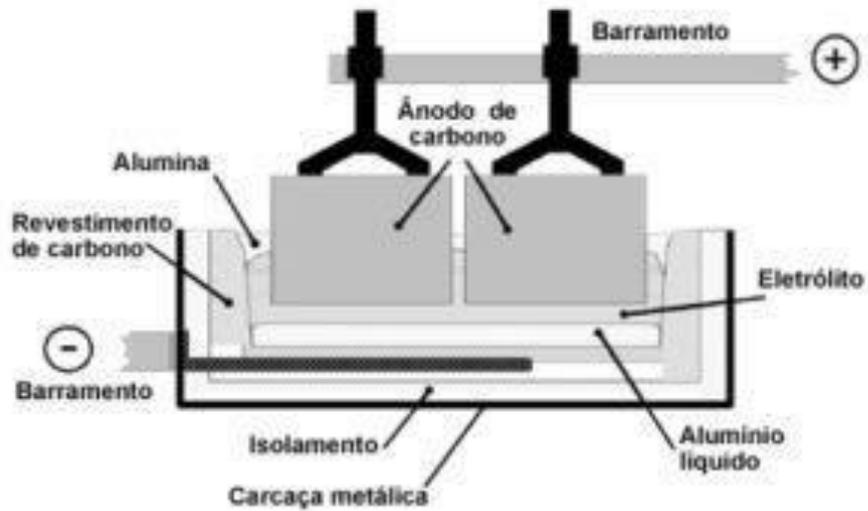


Figura 6 – Estrutura de uma cuba eletrolítica do Processo Hall-Héroult. Fonte: ABAL, 2019.



Figura 7 – Diagrama de blocos do Processo Hall-Héroult. Fonte: ABAL, 2019.

7 VISÃO GERAL DOS PROCESSOS DE REFINO DE BAUXITA

7.1 HISTÓRICO

Em 1888, foi desenvolvido e patenteado por Karl Josef Bayer o processo que hoje é mundialmente conhecido como o Processo Bayer (HIND *et al.*, 1999). Segundo Habashi (2005), este processo representa um marco na história da metalurgia, sendo considerado, ao lado do processo de cianetação para tratamento do ouro e da prata, o marco do nascimento da hidrometalurgia moderna.

Atualmente, o Processo Bayer é o principal processo utilizado para o refino da bauxita, com fins de obtenção de alumina (óxido de alumínio puro), durante a produção do alumínio primário. De acordo com Silva Filho *et al.* (2007), antes do surgimento do processo mencionado, o beneficiamento da bauxita era realizado através do Processo Le Chatelier, desenvolvido cerca de 30 anos antes por Louis Le Chatelier. Segundo os mesmos autores (2007), esse processo de refino de bauxita consiste no aquecimento da bauxita com carbonato de sódio (Na_2CO_3) a 1200°C , remoção, com água, dos aluminatos formados, precipitação do hidrato de alumínio $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ com CO_2 e, finalmente, a filtragem, secagem e limpeza do $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Silva Filho *et al.* (2007) destacam que o Processo Le Chatelier foi substituído pelo Processo Bayer, devido à drástica redução do custo de produção de alumina proporcionada pelo segundo processo. De acordo com Hind *et al.* (1999), o Processo Bayer é utilizado até hoje, praticamente sem mudanças, para o refino da bauxita, com a substituição do Na_2CO_3 pelo NaOH e a utilização de pressão durante a digestão sendo as duas mudanças significativas que ocorreram no processo ao longo do tempo.

Segundo Silva Filho *et al.* (2007), a literatura não é muito clara em relação às datas consideradas como marcos da evolução dos processos de produção de refino da bauxita. Porém, ainda assim, é possível estabelecer uma evolução cronológica destes processos, sendo que esta evolução cronológica dos processos de produção de alumina está representada, a seguir, nas Figura 6 a 8.

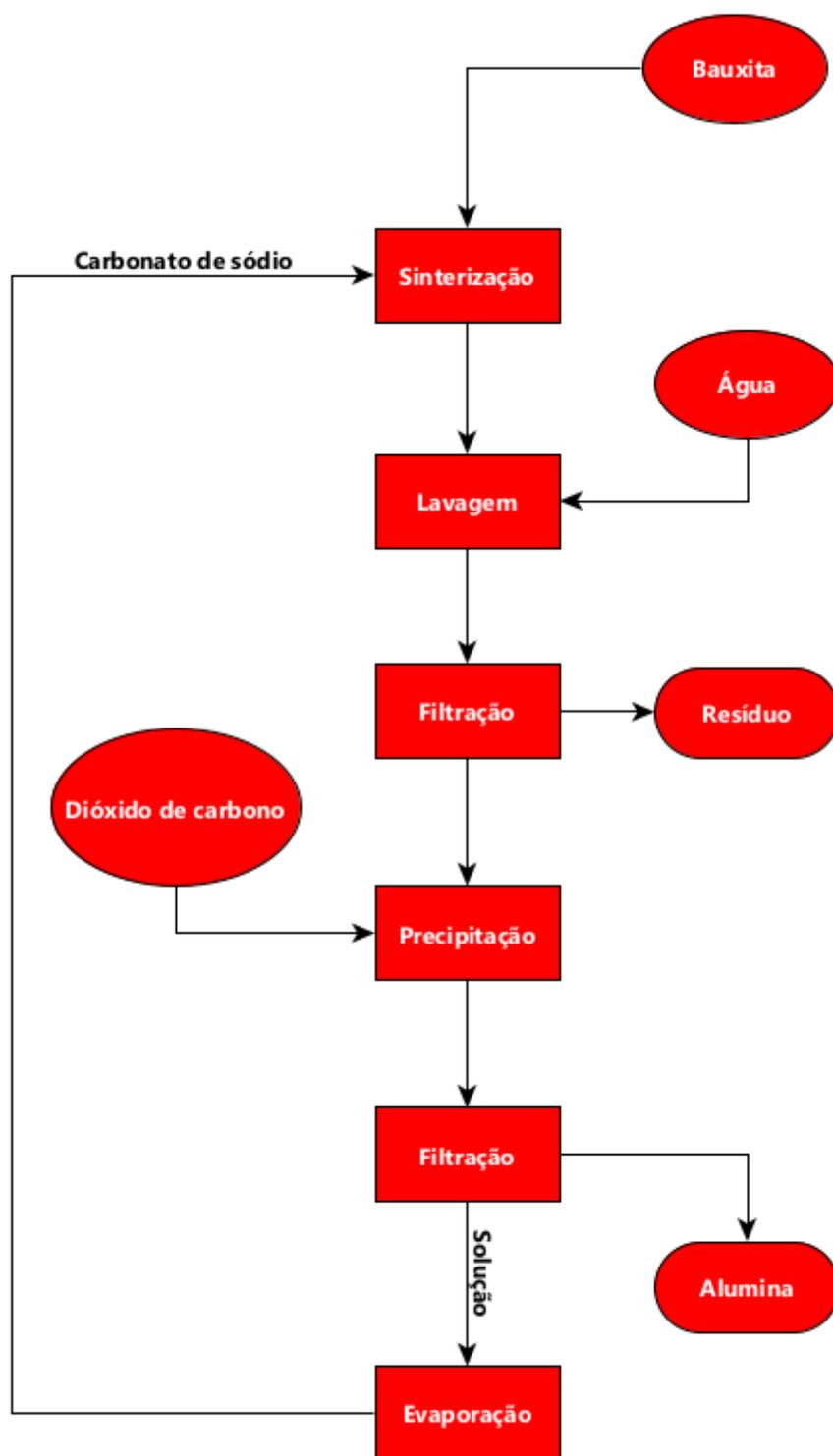


Figura 8 – Fluxograma do Processo Le Chatelier (1855). Fonte: Adaptado de HABASHI, 2015, p. 29.

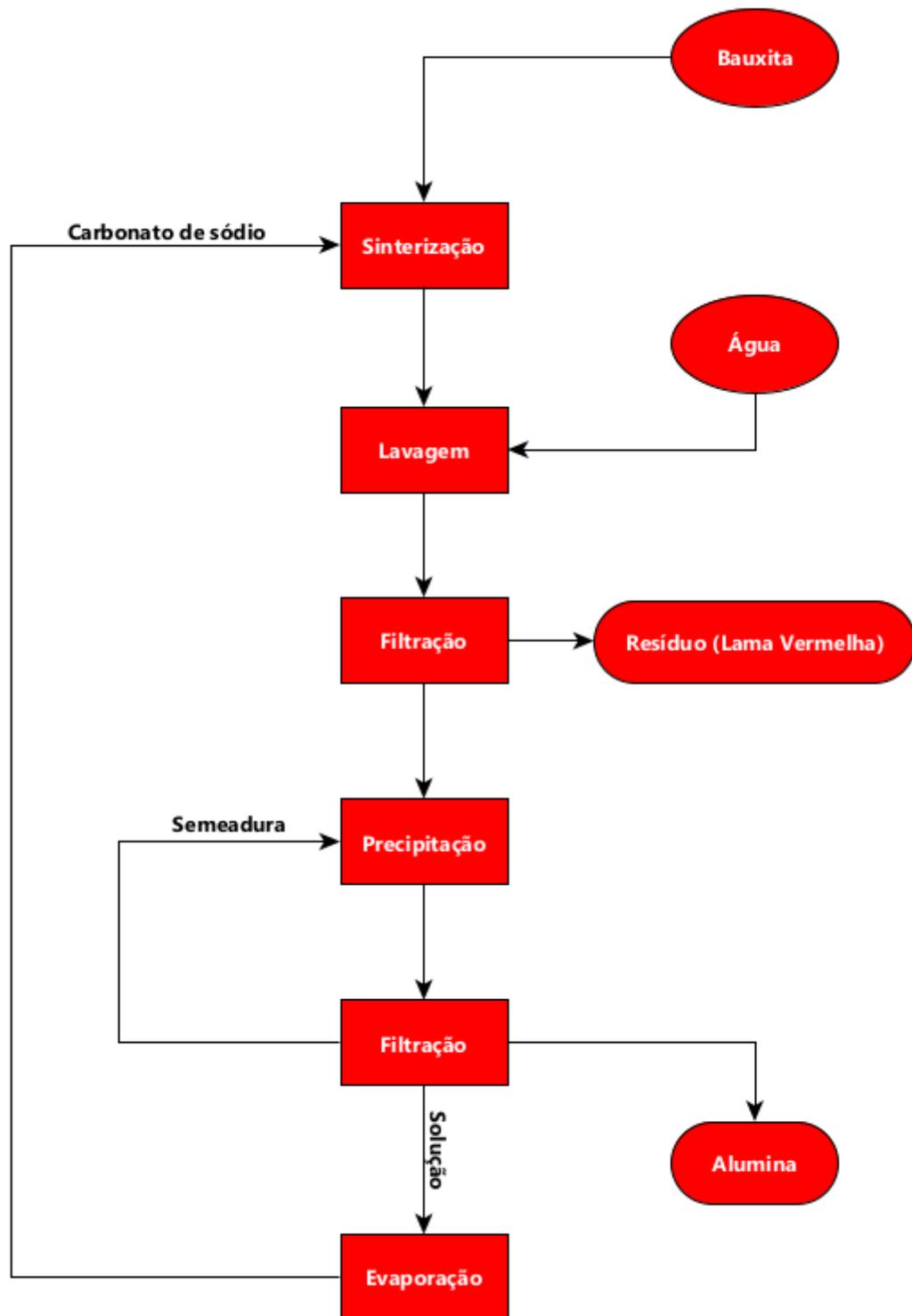


Figura 9 – Fluxograma do Processo Bayer em 1888. Fonte: Adaptado de HABASHI, 2015, p. 29.

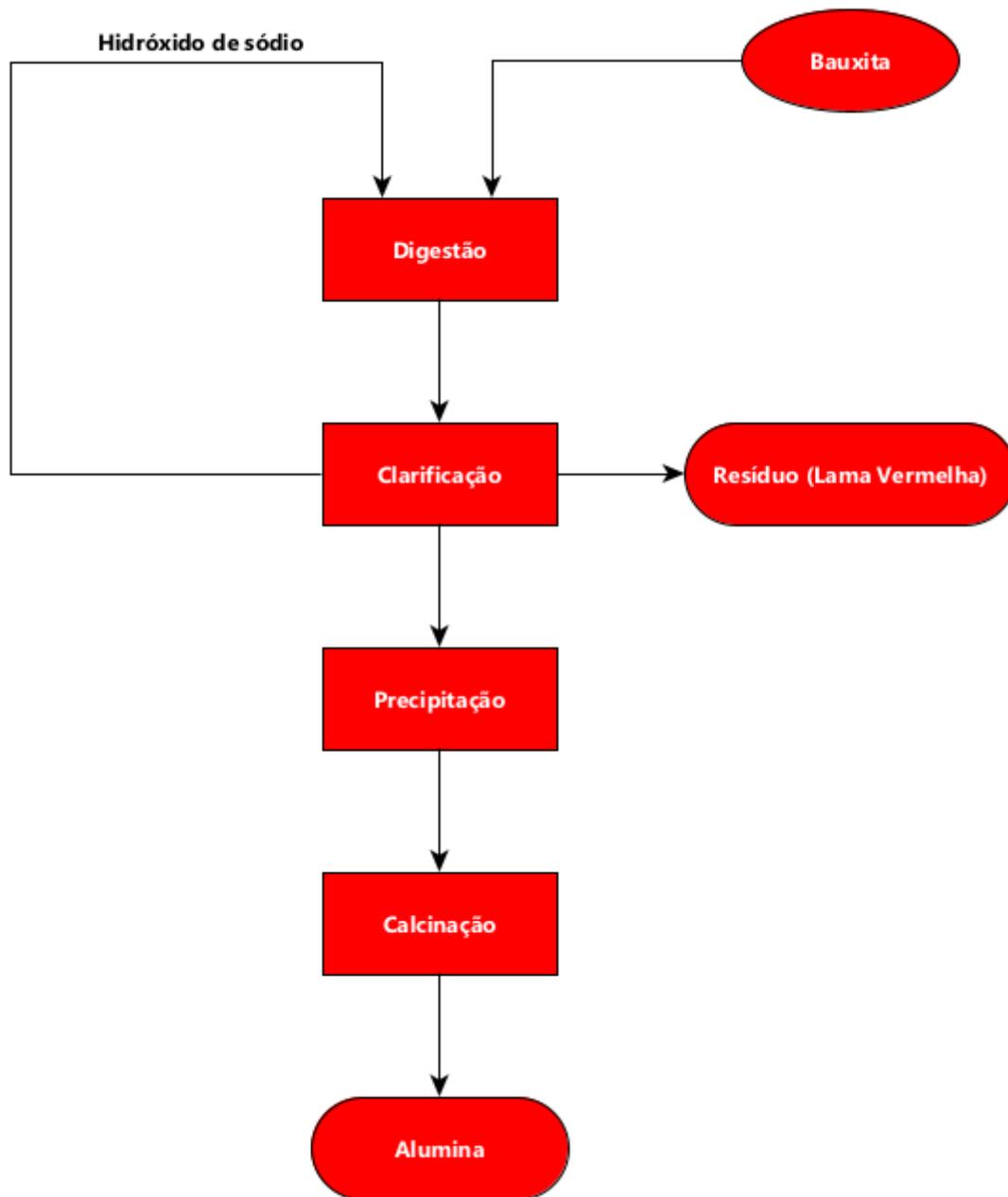


Figura 10 – Fluxograma do Processo Bayer em sua forma atual. Fonte: Adaptado de HABASHI, 2015, p. 29.

O Processo Bayer foi originalmente desenvolvido para atender uma demanda da indústria têxtil, que utiliza o Al_2O_3 para o tingimento do algodão (SILVA FILHO *et al.*, 2007). Porém, foi somente com sua associação ao processo eletrolítico de redução da alumina em alumínio, o Processo Hall-Hérault, desenvolvido no ano de 1886 pelo químico americano Charles Martin Hall e pelo cientista francês Paul Héroult, que o Processo Bayer ganhou importância na indústria metalúrgica.

7.2 VISÃO GERAL DO PROCESSO BAYER

7.2.1 Seleção do tipo de bauxita a ser utilizado

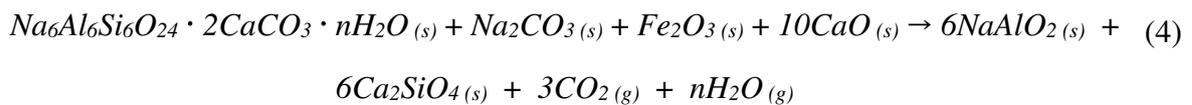
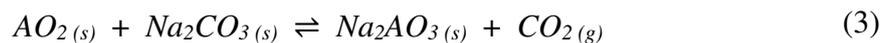
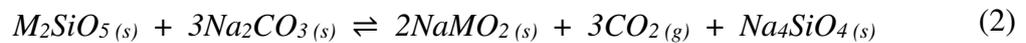
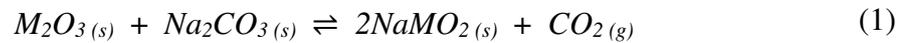
O Processo Bayer é basicamente utilizado para extrair hidrato de alumínio de minérios cuja proporção mássica de alumina para sílica (A/S) é maior ou igual a 7 (TABEREAUX; PETERSON, 2014). Estes minérios, normalmente, costumam ser minérios gibbsíticos e boehmíticos ou bauxitas formadas por misturas de gibbisita e boehmita. Tabereaux e Peterson (2014) explicam da seguinte forma como se dá o Processo de Sinterização, que é o processo de refino de bauxita utilizado como alternativa ao Processo Bayer para o refino de bauxitas altamente diaspóricas.

No caso da realização do refino de bauxitas altamente diaspóricas, com proporção mássica A/S inferior a 7, é feita a sinterização da bauxita com calcário e carbonato de sódio para formar aluminato de sódio e silicato de cálcio, sendo que após essa etapa do processo de sinterização, o sínter é lavado com água e uma solução de hidróxido de sódio, com o licor resultante sendo reciclado para dissolver o aluminato de sódio solúvel. Feito isso, a lama resultante é filtrada, com a precipitação do hidrato sendo promovida através do borbulhamento de dióxido de carbono na solução supersaturada de aluminato de sódio, sendo esta etapa do processo de sinterização conhecida como carbonatação. Ao final do processo de sinterização, enquanto ocorre a carbonatação da solução supersaturada de aluminato de sódio, a soda cáustica presente na solução é reciclada para extrair a alumina da bauxita sinterizada. (TABEREAUX; PETERSON, 2014)

Conforme visto na Figura 9, Habashi (2015) estabelece que a sinterização da bauxita para fins de obtenção de alumina começou com o Processo Le Chatelier, o primeiro processo utilizado para o refino de bauxita. Segundo Habashi (2015), neste processo, a sinterização era realizada a 1000°C, de modo a formar espécies lixiviáveis de aluminato de sódio.

Kaussen e Friedrich (2016) explicitam, também, que o Processo de Sinterização é conduzido a temperaturas que variam na faixa 1000-1200°C, definindo assim, o processo como uma digestão seca da bauxita. Além disso, Kaussen e Friedrich (2016) definem que o Processo de Sinterização é baseado no princípio da digestão soda-potassa ($\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3$), sendo que neste caso, é empregado o calcário (CaCO_3) no lugar da potassa (K_2CO_3).

Segundo Tam *et al.* (2019), o Processo de Sinterização foi melhorado através da introdução de uma etapa de calcinação para produzir alumina a partir do hidrato de alumínio $[Al(OH)_3]$ presente no sinter, com Dennis (2010) destacando que o Processo Deville-Pechiney, também, introduziu coque e cal aos processos de sinterização da bauxita já existentes. Dessa forma, Tam *et al.* (2019) estabelecem que, no Processo de Sinterização, a soda geralmente visa espécies metálicas portadoras de alumínio para formar espécies de aluminato, conforme mostrado nas Equações 1 a 4, que consistem nos mecanismos de reação do Processo de Sinterização propostos por Raghavan *et al.* (2011), Jander *et al.* (2006) e Tam *et al.* (2019).



De acordo com Tabereaux e Peterson (2014), quando o processo de sinterização é operado em conjunto com o Processo Bayer, visando a recuperação de alumina e soda da lama vermelha, tem-se um processo de extração combinado. Na tabela a seguir, são mostrados os principais tipos de bauxita utilizados para a produção de alumina durante a produção do alumínio primário, bem como suas características físicas e químicas, seus processos de refino, além das características da alumina resultante do refino de cada tipo de bauxita abordado.

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos e processos de refino dos três tipos de bauxita

Tipo de bauxita	Gibbsita	Boehmita	Díásporo
Processo de refino	Bayer	Bayer	Sinterização (com soda e calcário)
Fórmula química	$\alpha-Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	$\alpha-Al_2O_3 \cdot H_2O$	$\beta-Al_2O_3 \cdot H_2O$
Teor de alumina (%)	45-65	47-85	47-85

Teor de sílica (%)	1-5	2-5	4-16
Proporção alumina/sílica (mássica)	19	12	~4
Sistema cristalino	Monoclínico	Ortorrômbico	Ortorrômbico
Densidade (kg/m³)	2420	3010	3440
Temperatura de desidratação rápida (°C)	150	200-250	~450
Teor de soda (Na₂O) no licor (g/l)	120-150	205-245	240-360
Pressão de digestão (MPa)	1	1	~3,5
Energia necessária para digestão (GJ/t)	7,5-12	11-16	34-45
Características da alumina resultante do refino	Alumina arenosa, resultante de uma baixa perda de soda durante o refino e com características normais de composição orgânica.	Alumina farinhenta, resultante de um refino com alta perda de soda, acompanhado da formação de produtos de dessilicação (PDS), além de um alto teor oxalatos orgânicos.	Alumina farinhenta, com presença de impurezas na forma de sólidos finos, e de granulometria mais grossa (aproximadamente 45 µm).

Fonte: Adaptado de TABEREAUX; PETERSON, 2014, p. 842.

Conforme mostrado na Tabela 1, as informações a respeito dos três principais tipos de bauxita encontrados na natureza, trazidas por Tabereaux e Peterson (2014), corroboram o ponto de vista levantado por Arenare (2008) a respeito da presença de diásporo em bauxitas, que é a ideia de que a presença de diásporo não é desejada em bauxitas metalúrgicas, por conta deste tipo de minério de alumínio exigir temperaturas e pressões mais elevadas para que ocorram a sua solubilização.

Este fato é confirmado pelos dados de temperatura de desidratação rápida, pressão de digestão e energia necessária para digestão, levantados por Tabereaux e Peterson (2014), para os três principais tipos de bauxita encontrados na natureza. Um exemplo de demonstração do ponto de vista de Arenare (2008) a respeito da não-desejabilidade da presença de diásporo em bauxitas metalúrgicas, confirmado pelos dados obtidos por Tabereaux e Peterson (2014) a respeito dos dois principais processos de refino de bauxita, o Processo Bayer e o Processo de Sinterização, é o fato de que a energia necessária para a digestão do diásporo, em GJ/t, é de duas a três vezes maior que a energia, em GJ/t, necessária para a digestão da gibbsita ou da boehmita.

7.2.2 Etapas do Processo Bayer

Conforme mostrado na Figura 10, atualmente, o Processo Bayer é composto por quatro etapas, sendo estas a digestão da bauxita, a clarificação do licor cáustico, a precipitação do hidrato de alumínio, e a calcinação deste para a obtenção da alumina. Este processo de refino de bauxita corresponde à segunda etapa da cadeia de produção do alumínio primário, que é a etapa do refino da bauxita para fins de produção de alumina que é o óxido de alumínio em sua forma pura e que é a principal matéria-prima para a produção de alumínio metálico através de redução eletrolítica. Na Figura a seguir, é mostrado de forma geral o fluxo de processo, bem como os principais equipamentos industriais componentes, do Processo Bayer.

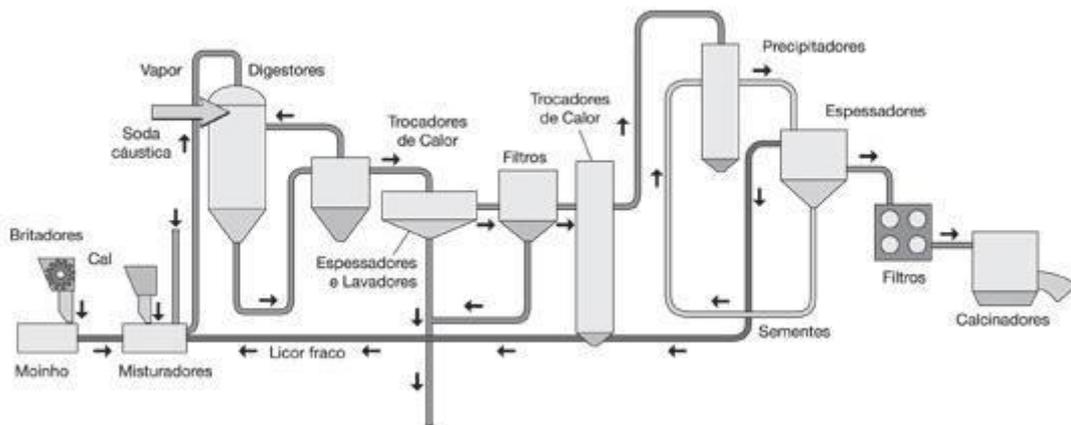


Figura 11 – Esquema de fluxo do Processo Bayer. Fonte: ABAL, 2019.

7.2.3 Moagem e dissolução da bauxita em soda cáustica

De acordo com o IAI (2018) e Tabereaux e Peterson (2014), ao início do Processo Bayer, a bauxita beneficiada é moída com o objetivo de reduzir o seu tamanho de partícula e, então, peneirada, o que é feito para aumentar a área superficial das partículas do minério, de modo a aumentar a velocidade das reações de digestão. Segundo Tabereaux e Peterson (2014), a bauxita beneficiada e moída é misturada com hidróxido de sódio em um moinho especial para produzir uma lama que contém de 35% a 40% de sólidos, o que é feito de forma a facilitar a extração do hidróxido de alumínio ou hidrato da bauxita processada.

7.2.4 Dessilicação

Esta etapa do Processo Bayer ocorre antes da digestão da bauxita e consiste na remoção da sílica da solução de processo (IAI, 2018). Segundo Tabereaux e Peterson (2014), durante a etapa de dessilicação, a lama gerada pela mistura da bauxita moída com NaOH é mantida a uma temperatura próxima à sua temperatura de ebulição nas condições normais de pressão, estando a temperatura da solução de processo entre os 90°C e os 100°C.

De acordo com o IAI (2018), a realização desta etapa do processo é altamente necessária em bauxitas com alto teor de sílica, uma vez que além de causar problemas de incrustação em trocadores de calor, altos teores de sílica na bauxita afetam de forma negativa a qualidade da alumina produzida. Além disso, Tabereaux e Peterson (2014) abordam da seguinte

maneira a formação do Produto de Dessilicação (PDS) nesta etapa do Processo Bayer, além da importância da realização desta etapa do processo.

O PDS tem como fórmula química $3\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2\cdot \text{X}$, onde X representa uma variedade de ânions inorgânicos como sulfatos, carbonatos, cloretos, aluminatos, hidróxidos, assim como, outros compostos orgânicos. O PDS formado é a principal fonte de perda de soda, sendo esta de 80-90% de perda de soda para a sílica reativa contida no PDS, com o restante da soda sendo transferido para a etapa de digestão. A perda de soda do licor consiste em uma importante penalidade econômica para o Processo Bayer como um todo, sendo que por esta razão, bauxitas com um teor de sílica reativa maior que 8% são consideradas pela indústria como não-econômicas para refino. (TABEREAUX; PETERSON, 2014)

7.2.5 Digestão

De acordo com Tabereaux e Peterson (2014), as condições de digestão são especialmente projetadas para favorecer a distribuição de fases aluminosas na bauxita, sendo que os tempos de digestão são geralmente determinados não pela dissolução da gibbsita, mas sim, pela cinética de formação de PDS residual e, acima de tudo, pela redução da sílica solúvel contida na solução de processo.

Nesta etapa do Processo Bayer, a lama que contém minerais portadores de alumínio, provenientes da bauxita, é bombeada de tanques de armazenamento para uma série de autoclaves que consistem em vasos digestores (KOPELIOVICH, 2012). Segundo Kopeliovich (2012) e o IAI (2018), nos digestores, os minerais portadores de alumínio (gibbsita, boehmita e disáporo), presentes na bauxita, são solubilizados para formar uma solução supersaturada de aluminato de sódio, também conhecida como licor rico.

Kopeliovich (2012), Tabereaux e Peterson (2014) e o IAI (2018) definem, ainda, que a temperatura e pressão de digestão depende da composição mineralógica da bauxita, com o IAI (2018) destacando que a digestão de bauxitas gibbsíticas é conduzida a uma temperatura de 110-140°C e a uma pressão de 1 MPa, ao passo que a digestão de bauxitas boehmíticas e diaspóricas se dá a temperaturas situadas na faixa de 200-280°C e a uma pressão na faixa de 1,0-3,5 MPa.

De acordo com Tabereaux e Peterson (2014), mesmo o tempo de digestão não sendo ditado pela cinética de dissolução da alumina, este é mantido a um valor mínimo de modo a prevenir uma excessiva dissolução de quartzo, o que pode promover a formação de mais sílica reativa, sendo que a adição de 1-2% de CaO ou cal facilita a extração de óxido de alumínio em minérios que contém mais de 8% de boehmita ou diásporo.

Além disso, segundo Tabereaux e Peterson (2014), a digestão converte em hidróxido de alumínio os minerais portadores de alumínio presentes na bauxita, sendo que o $\text{Al}(\text{OH})_3$ se comporta quimicamente de maneira anfotérica, neutralizando as bases que dissolvem na solução forte de hidróxido de sódio, a altas temperaturas e pressões, conforme mostrado nas Equações 5 e 6, a seguir.

Gibbsita:



Boehmita e diásporo:



Tabereaux e Peterson (2014) e o IAI (2018) explicitam que a lama quente, contendo aluminato de sódio passa por uma série de tanques flash, sendo resfriada a 106°C e sob pressão atmosférica, de modo a reduzir a pressão da solução e recuperar calor que possa ser reutilizado no processo de refino, sendo que a bauxita é alimentada nessa etapa do Processo Bayer de forma a atingir um estado de supersaturação de alumina que possa garantir a estabilidade desse óxido durante as passagens da solução de processo pelos tanques flash, ao final da digestão, bem como durante a etapa de clarificação.

De acordo com o IAI (2018), mesmo que temperaturas mais altas de resfriamento pós-digestão do licor cáustico sejam, teoricamente, vantajosas, existem algumas desvantagens na condução do processo de resfriamento pós-digestão dessa forma, como por exemplo, a dissolução de óxidos que não sejam a alumina no licor rico.

7.2.6 Clarificação

De acordo com o Tabereaux e Peterson (2014), nesta etapa do Processo Bayer, a solução de processo é bombeada até um tanque no qual é clarificada, ao passo que as impurezas que consistem de óxidos insolúveis que não se dissolvem no licor cáustico, são separadas do licor rico, que possui altos teores de aluminato de sódio, através do emprego de uma operação unitária conhecida como decantação. O IAI (2018) expressa da seguinte forma como é conduzida a etapa de clarificação.

O primeiro estágio da clarificação envolve a separação dos sólidos (resíduo de bauxita) do licor cáustico por meio da decantação, com aditivos químicos (floculantes) podendo ser adicionados à solução de processo para auxiliarem na decantação, por meio da aceleração do adensamento das partículas a serem decantadas. O resíduo de bauxita se acumula no fundo dos tanques de decantação, sendo em seguida, transferido para tanques de lavagem, nos quais passam por uma série de estágios de lavagem a fim de recuperar soda cáustica, de modo a reutilizá-la na etapa de digestão. Um maior grau de separação do licor rico do resíduo de bauxita pode ser alcançado através da adição de uma série de filtros de segurança, cujo propósito é garantir que o produto final não seja contaminado por impurezas presentes nos resíduos de bauxita. Dependendo dos requisitos de disposição de resíduos de bauxita, mais estágios de filtração e espessamento dos resíduos de bauxita podem ser empregados antes de enviar os resíduos para a ADRB. (IAI, 2018)

De acordo com Tabereaux e Peterson (2014), durante a etapa de clarificação, a solução de processo é resfriada e filtrada, com as partículas acima de 100 μm sendo removidas em um tanque de decantação ou em um ciclone, com a fração grossa (já separada do licor rico) sendo enviada para áreas de disposição a longo prazo.

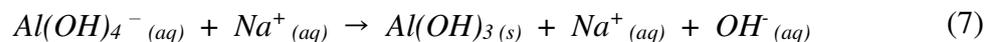
A fração grossa de partículas, separada do licor rico durante a clarificação, consiste nos resíduos de bauxita gerados nessa etapa do Processo Bayer e são conhecidos como resíduos de refino de bauxita ou “lama vermelha”. Segundo Kopeliovich (2012), estes resíduos são ricos em sílica, óxido de ferro e óxidos de elementos traços como cálcio e titânio.

7.2.7 Precipitação

De acordo com Tabereaux e Peterson (2014), nesta etapa do Processo Bayer, após ser resfriado de 100°C a 75°C, o licor filtrado é bombeado através de uma série de tanques de precipitação (ou precipitadores), cujas alturas são comparáveis à de um prédio de seis andares, sendo que nestes tanques, cristais semeadores sólidos de hidrato de alumina são adicionados ao licor, a partir do topo de cada precipitador.

Segundo Kopeliovich (2012), o licor clarificado é transportado dos decantadores para os precipitadores através da passagem deste por uma série de trocadores de calor que transferem o calor da solução para o licor já processado, também conhecido como licor pobre, que flui em contracorrente em relação ao licor clarificado que entra na precipitação.

Kopeliovich (2012) explicita, ainda, que a precipitação do trihidróxido de alumínio hidratado ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$), também conhecido como hidrato, é promovida através da semeadura do licor clarificado com cristais de alumina pura, que agem como nucleadores durante o processo de precipitação dos cristais de hidrato. Segundo o IAI (2018), a etapa de precipitação é conduzida pelo resfriamento progressivo do licor rico clarificado, que resulta na formação de cristais de hidrato que crescem e se aglomeram para formar cristais maiores. Além disso, de acordo com o IAI (2018), a reação de precipitação é, basicamente, a reação contrária à reação de digestão da gibbsita, conforme mostrado, a seguir, na Equação 7. Ademais, Tabereaux e Peterson (2014) explicitam da seguinte forma as propriedades desejáveis dos cristais semeadores de hidrato para que a precipitação seja conduzida com sucesso.



Pode ocorrer no licor uma nucleação indesejada de partículas de hidrato de alumina cujos diâmetros de partícula são menores que 1 µm. Além disso, é desejável que os cristais semeadores causem uma cimentação de pequenos cristais de hidrato de alumínio (1-45 µm de diâmetro) que crescem para formar grandes cristais aglomerados cujos diâmetros ultrapassam os 45 µm, ao passo que estes se decantam através do líquido e se ligam com alumina dissolvida. (TABEREAUX; PETERSON, 2014)

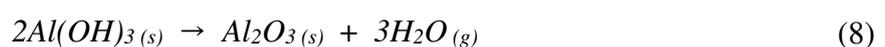
Após a precipitação, uma certa quantidade de impurezas de soda (Na_2O) oclusas, ficam presas ao hidrato precipitado (TABEREAUX; PETERSON, 2014). Segundo Tabereaux e Peterson (2014), a teoria primária para o controle da precipitação é a de maximizar o rendimento (medido em gramas de alumina precipitada por litro de solução de aluminato de sódio) enquanto se mantém o balanço entre a soda presente no produto e a sementeira, o que é alcançado através do controle da temperatura de enchimento do licor, o que impacta na oclusão de soda, superestação do licor, geração de partículas finas e precipitação de oxalatos. Ademais, de acordo com Tabereaux e Peterson (2014), a segunda teoria primária para o controle da precipitação é a de que o controle da alimentação de sementeira impacta no teor de finos do produto desta etapa do Processo Bayer, no balanço de sementeira e no desgaste de partícula.

De acordo com Tabereaux e Peterson (2014) e Kopeliovich (2012), ao final da precipitação, o precipitado branco sólido é filtrado e concentrado por evaporação, resultando em uma torta de hidróxido de alumínio, com as partículas grossas sendo separadas e enviadas para a calcinação e, as partículas finas sendo recicladas para serem reutilizadas como sementeira de cristais de hidrato.

7.2.8 Calcinação

De acordo com Kopeliovich (2012), nesta que é a última etapa do Processo Bayer, o hidrato é lavado, filtrado e calcinado em um forno rotativo, ou em um forno calcinador estacionário de suspensão gasosa, ou em calcinadores de leito fluidizado, a uma temperatura que varia entre os 750°C e os 1260°C , de modo a eliminar a água que se encontra quimicamente ligada ao hidrato para forma alumina anidra ao final do processo.

De acordo com Tabereaux e Peterson (2014), a indústria está descontinuando o uso de fornos rotativos, substituindo estes fornos por calcinadores estacionários, por conta deste último tipo de calcinador consumir, aproximadamente, 33% menos energia (3,0 GJ/t de alumina produzida nos calcinadores estacionários contra 4,5 GJ/t de alumina produzida nos fornos rotativos). Além disso, a calcinação é a etapa que é responsável por 25% do consumo de energia do Processo Bayer (TABEREAUX e PETERSON, 2014). A equação da reação química característica da calcinação é mostrada a seguir, na Equação 8.



Segundo Kopeliovich (2012), quando o hidrato é calcinado a uma temperatura na faixa de 750-1100°C, o tipo de cristais de alumina formados é conhecido como o estado cristalino gama da alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), com Tabereaux e Peterson (2014) destacando que a alumina tecnicamente pura é conhecida como alumina de grau de fundição (AGF) e possui teores de impurezas de, no máximo, 0,01-0,02% SiO_2 , 0,01-0,03% Fe_2O_3 , e 0,3-0,6% Na_2O .

Ademais, Kopeliovich (2012) e Tabereaux e Peterson (2014) também explicitam que caso se deseje obter alumina quimicamente inerte, de grau cerâmico, ao final desta etapa do Processo Bayer, o hidróxido de alumínio deve ser calcinado a uma temperatura na faixa de 1150-1260°C, de modo a obter a alumina em seu estado cristalino alfa ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), também conhecida como coríndon.

7.3 FORMAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE BAUXITA

7.3.1 Disposição em alto mar

Até a década de 1960, esta era uma das formas mais comuns de disposição de resíduos de bauxita. Este método de disposição de RB consistia na transferência dos resíduos para uma tubulação de descarga em alto mar, feita após a realização de um tratamento feito com fins de redução dos teores cáusticos dos resíduos. A adoção deste método de disposição de resíduos do refino de bauxita caiu em desuso a partir da década de 1970 muito por conta das preocupações com os impactos ambientais gerados por essa forma de disposição de RB. Segundo o IAI (2018), a partir de 1970, mais nenhuma refinaria de bauxita foi construída tendo em vista a disposição de RB por meio deste métodos, sendo que estudos realizados pela mesma instituição, em parceria com a Associação Europeia do Alumínio, cujos resultados foram publicados em 2015, mostram que mesmo com um potencial de gerar altos impactos ambientais para a fauna e a flora marinhas dos locais de descarga de resíduos do refino de bauxita, poucos efeitos adversos para o meio ambiente marinho local foram observados em áreas de estudo localizadas no Mar Mediterrâneo e no Oceano Pacífico.

7.3.2 Disposição em lagoas

Até a década de 1990, a maioria dos resíduos gerados pelo refino de bauxita era armazenada em lagoas nas quais camadas de materiais impermeáveis ou selantes eram

colocadas nas paredes e no fundo do reservatório a fim de prevenir a infiltração dos resíduos no solo.

De acordo com Power *et al.* (2011) e Tabereaux (2019), neste método de disposição de RB, uma barragem ou um dique baixo é construído(a) para contenção dos resíduos na lagoa e a lama vermelha, contendo de 20-40% de sólidos, é bombeada para a área de disposição de resíduos de bauxita, com a separação dos sólidos sendo feita por decantação, auxiliada pela gravidade.

Segundo Tabereaux (2019), com o tempo, a lama se decanta e a água resultante da decantação é retornada para o processo de refino da bauxita, sendo que à medida que a lagoa vai sendo preenchida, as barragens e os diques vão tendo as alturas das suas paredes aumentadas, ou caso seja necessário armazenar volumes ainda maiores de RB, dedica-se uma área maior para a construção de mais lagoas de disposição de resíduos de bauxita, ao passo que lagoas que já se encontram totalmente preenchidas podem ser tampadas para seu fechamento.

De acordo com Evans *et al.* (2012), é muito importante que os resíduos de bauxita a serem estocados em lagoas sejam neutralizados antes do seu envio para alguma lagoa de resíduos localizada na ADRB, visto que caso os resíduos de bauxita não sejam neutralizados antes da sua disposição na lagoa de estocagem, estes saem para estocagem com um pH muito alto, o que faz com a lagoa se torne uma área de lama mal compactada, coberta por um lago altamente alcalino.

Dessa forma, Evans *et al.* (2012) frisam que a disposição de resíduos de bauxita não-neutralizados em lagoas de estocagem gera riscos de segurança e riscos ambientais, incluindo situações de potencial contato de seres humanos e vida selvagem com o licor e a lama alcalinos, além da contaminação de corpos d'água e lençóis freáticos por meio da infiltração de licor cáustico e outros contaminantes químicos nesses ecossistemas aquáticos, o que aumenta ainda mais os custos de fechamento e reabilitação ambiental das áreas das lagoas.

7.3.3 Empilhamento a seco

Segundo Tabereaux (2019), atualmente, a metodologia de referência e a mais utilizada para a disposição de resíduos provenientes do refino de bauxita é o empilhamento a seco, uma vez que esta forma de disposição de RB permite uma redução do potencial de vazamento de licor cáustico para o meio ambiente ao redor da ADRB, além de permitir uma redução da área

requerida para o armazenamento de tais resíduos, e maximizar as taxas de recuperação de soda e de alumina. Power *et al.* (2011) e Tabereaux (2019) ressaltam que para que possa disposta por meio de empilhamento a seco, a lama vermelha deve ser um fluido tixotrópico, com um alto teor de sólidos, com Evans *et al.* (2012) destacando que este parâmetro físico-químico dos resíduos de bauxita dispostos deve estar entre os 45% e os 55% para que seja possível a disposição dos mesmos por meio de empilhamento a seco.

Em seu artigo sobre formas de disposição de resíduos de bauxita, Tabereaux (2019) explicita que no preparo para serem dispostos por meio de empilhamento a seco, os resíduos de bauxita são adensados para formar uma lama mais grossa, através do uso de espessadores avançados, floculação e técnicas de filtração que visam a remoção de água dos resíduos. De acordo com Balomenos *et al.* (2018), a técnica de filtração mais utilizada no preparo dos resíduos de bauxita para sua disposição por empilhamento a seco é a filtragem dos mesmos em filtros prensa, com Tabereaux (2019) destacando que, em seguida, a lama vermelha espessada é bombeada através de uma tubulação até à área de estocagem de resíduos de bauxita e espalhada em camadas por essa área, permitindo assim com que esses resíduos percam água através de uma combinação de drenagem e secagem por evaporação. Tabereaux (2019) explica da seguinte forma como se dá consolidação de resíduos de bauxita dispostos através de empilhamento a seco.

A lama vermelha, então, se consolida e seca antes que mais camadas de RB sejam depositadas. Isto forma um declive no depósito, o que permite com que a água da chuva seja mais facilmente escoada através do depósito de RB, o que por sua vez, contribui para minimizar a quantidade de líquido armazenado na ADRB, minimizando assim, os riscos de vazamento de RB, e melhorando também, a integridade estrutural da área. A água recuperada da superfície do local de disposição dos resíduos de bauxita empilhados a seco é bombeada de volta à planta para que possam ser recuperados e reciclados os sais solúveis de sódio, sendo que a lama vermelha empilhada a seco, geralmente, tem mais de sua água drenada por debaixo do depósito para que mais água seja recuperada para fins de reuso na refinaria de bauxita, além de melhorar a consolidação do RB disposto. Além disso, é sabido que a combinação do empilhamento a seco com uma boa drenagem do depósito de resíduo de bauxita resulta em um depósito de RB bastante estável. (TABEREAUX, 2019)

Segundo Tabereaux (2019), um “cultivo” rotineiro da lama vermelha, feito com o uso de rolos compactadores ou veículos propulsionados por parafuso, ajuda os resíduos de bauxita a alcançarem uma densidade que maximiza a eficiência de estocagem da pilha de resíduos. Além disso, Tabereaux (2019) explicita que uma redução considerável da quantidade de água presente nas pilhas de RB dispostos através de empilhamento a seco pode ser alcançada através da compactação, consolidação e aperto da superfície da pilha de resíduos, o que também, ajuda a promover um maior contato entre os resíduos dispostos a seco e o ar ambiente, o que por sua vez, promove a carbonatação, reduzindo assim, o pH dos resíduos dispostos. Com isso, Power *et al.* (2011) destacam que, ao final da consolidação, os resíduos de bauxita dispostos por empilhamento a seco atingem um teor de sólidos entre os 62% e os 70%.

7.3.4 Disposição a seco

De acordo com Power *et al.* (2011) e Tabereaux (2019), no método de disposição a seco, a lama vermelha é filtrada para formar uma torta seca, contendo mais de 65% de sólidos, sendo que através de um processo de filtragem a água ou a vapor, a alcalinidade da lama é diminuída, permitindo assim, uma maior recuperação de soda cáustica desse resíduo.

Segundo Kinnarinen *et al.* (2015), a filtragem realizada no preparo dos resíduos de bauxita para disposição a seco consiste em uma filtração adicional dos resíduos gerados ao longo do processo de refino da bauxita, seguida de uma sequência de lavagens da torta gerada, finalizando com uma filtragem da mesma, a altas pressões, em filtros hiperbáricos. Kinnarinen *et al.* (2015) destacam que após a filtragem hiperbárica, os RB saem do processo com um teor de sólidos maior que 70%, com até 98% da soda cáustica presente nos resíduos sendo recuperada e reciclada para a etapa de digestão do processo de refino.

De acordo com Tabereaux (2019) caso após a filtragem hiperbárica, não haja mais qualquer tratamento, o RB seco é carregado até à ADRB, onde é depositado em pilhas com ângulo de empilhamento igual a 5°. Além disso, Tabereaux (2019) complementa da seguinte forma o seu ponto-de-vista a respeito da disposição a seco de resíduos de bauxita.

Neste método de disposição de resíduos de bauxita, a água, que sai como efluente da área de disposição dos resíduos de bauxita, é coletada e enviada para uma estação de tratamento onde tem seu pH neutralizado, para de lá, ser disposta nos corpos d'água próximos. Além disso, mesmo que esta forma de disposição de resíduos de bauxita

contribua significativamente para a redução da área destinada à disposição de RB, a utilização da disposição a seco como forma de dar uma destinação final aos resíduos provenientes do refino de bauxita requer a instalação e a operação de uma planta de filtração. (TABEREAUX, 2019).

Um caso de sucesso da aplicação da disposição a seco como forma de disposição de resíduos de bauxita é o estudo feito por Castro *et al.* (2012) no qual os autores mostram que em Barcarena, PA, os benefícios da mudança da forma de disposição de resíduos de bauxita, do empilhamento a seco para a disposição a seco, incluem o aumento no teor de sólidos da lama vermelha de 64% p. para 85% p., uma redução de 20% da quantidade de resíduos gerada durante o refino da bauxita, além de uma redução de 44% da quantidade de líquido disposta junto com os resíduos de bauxita.

8 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS RESÍDUOS DE BAUXITA

8.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Segundo Power *et al.* (2011), mesmo que haja operações de filtração realizadas, visando a redução do teor cáustico dos resíduos provenientes do refino de bauxita, estes ainda saem para estocagem nas ADRB com alta alcalinidade e altos teores de sódio. De acordo com Miura (2016), as propriedades físico-químicas dos resíduos de bauxita são determinadas pela própria natureza do minério e pelos efeitos de processamento que ocorrem ao longo do Processo Bayer. Dentre esses fatores, podem se destacar aspectos mineralógicos do local das minas onde é extraída a bauxita utilizada para o refino para a produção de alumina, uma vez que irá influenciar na composição química do minério, além de parâmetros operacionais de processo característicos, não só do Processo Bayer em si, como também, até mesmo do processo de beneficiamento que ocorre durante a etapa de mineração, sendo estes parâmetros definidos da forma como a empresa responsável pelas plantas de beneficiamento e refino da bauxita defina como a mais conveniente.

8.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

8.2.1 Distribuição de tamanho de partícula

A principal característica física dos resíduos de bauxita que irá ditar suas demais propriedades físicas é a distribuição de tamanhos de partícula deste material. Segundo Terzaghi *et al.* (1996), a distribuição de tamanhos de partícula é uma das propriedades-chave de cada material, uma vez que esta irá governar o comportamento físico-químico geral de cada material. De acordo com Miura (2016), a distribuição de tamanho de partícula dos resíduos de bauxita depende do processo de separação das partículas de areia após a extração da alumina do minério.

Miura (2016) aponta, ainda, que a literatura diverge quanto aos tamanhos das partículas dos resíduos resultantes do refino da bauxita, destacando que que Menzies *et al.* (2004) mostraram em seu trabalho que o resíduo de bauxita analisado apresentou uma distribuição de tamanho de partícula entre 10 μm e $\geq 1000 \mu\text{m}$, com mais de 50% das partículas sendo maiores que 250 μm , e as menores frações observadas tendo um diâmetro de partícula na faixa entre $\leq 0,1 \mu\text{m}$ e 100 μm .

Além disso, Miura (2016) ressalta que Snars e Gilkes (2009) publicaram um trabalho no qual os autores mencionados coletaram e analisaram 11 amostras de RB provenientes de diferentes refinarias, divididas em três classes de tamanho ($< 2 \mu\text{m}$, 2-20 μm e $> 20 \mu\text{m}$), com os resultados apontando que, em média, 31% das partículas foram classificadas na faixa de diâmetro $< 2 \mu\text{m}$, 46% na faixa entre 2 e 20 μm e 23% na faixa de diâmetro de partícula $> 20 \mu\text{m}$.

Dessa forma, Miura (2016) estabelece que a variação no tamanho das partículas dos resíduos de bauxita se deve às diferenças das tecnologias adotadas nos processos de refino de bauxita em cada refinaria, parâmetros operacionais dos processos de refino, além da qualidade do minério de bauxita em si. Ademais, é importante ressaltar que a qualidade do minério é determinada pela sua composição química, que por sua vez, é definida por aspectos mineralógicos do próprio minério.

Em relação às lamas vermelhas de origem brasileira, a Tabela 2 e as Figuras 12-15 mostram as diferenças entre as distribuições de tamanho e diâmetros de partícula observados em cada um dos resíduos provenientes de diferentes localidades, analisados por diferentes autores.

Tabela 2 – Diâmetros de partícula de resíduos de bauxita provenientes de diferentes refinarias brasileiras

Localidade	Referência	Diâmetro de partícula (μm)		
		D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
-	-	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
São Luís, MA	Rivas Mercury <i>et al.</i> (2010)	0,40	3,80	8,42
São Luís, MA	Ferreira (2019)	0,76	3,62	59,80
Barcarena, PA	Lima (2015)	1,25	7,30	130
Poços de Caldas, MG	Manfroi (2009)	0,38	3,20	8,25

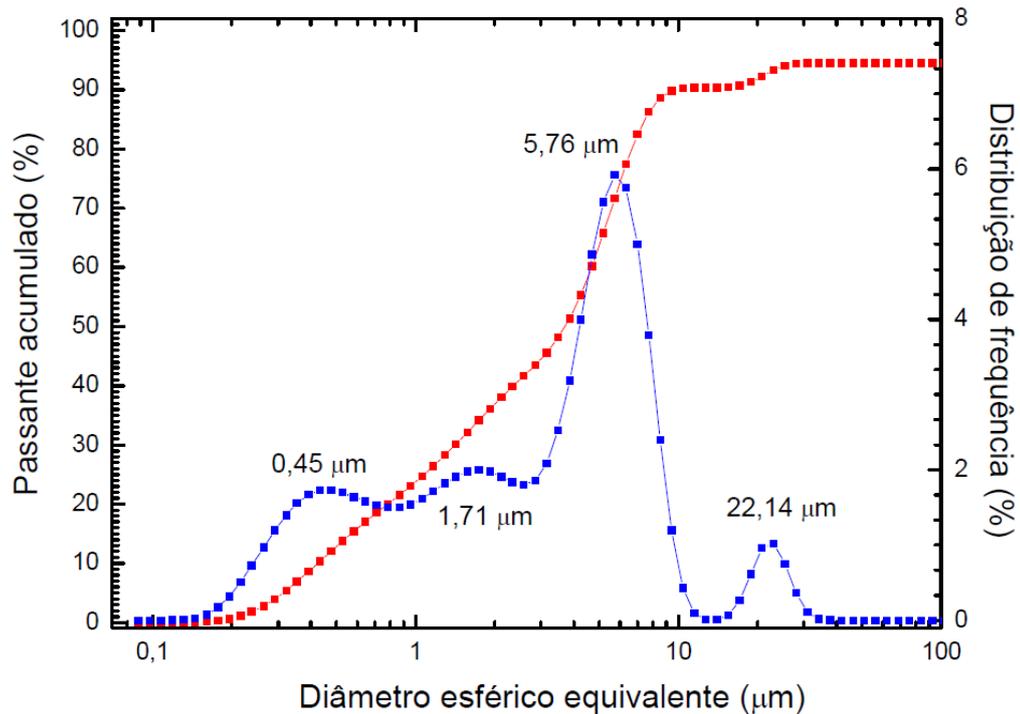


Figura 12 – Distribuição granulométrica de resíduos de bauxita provenientes de São Luís, MA. Fonte: RIVAS MERCURY *et al.*, 2010, p. 450.

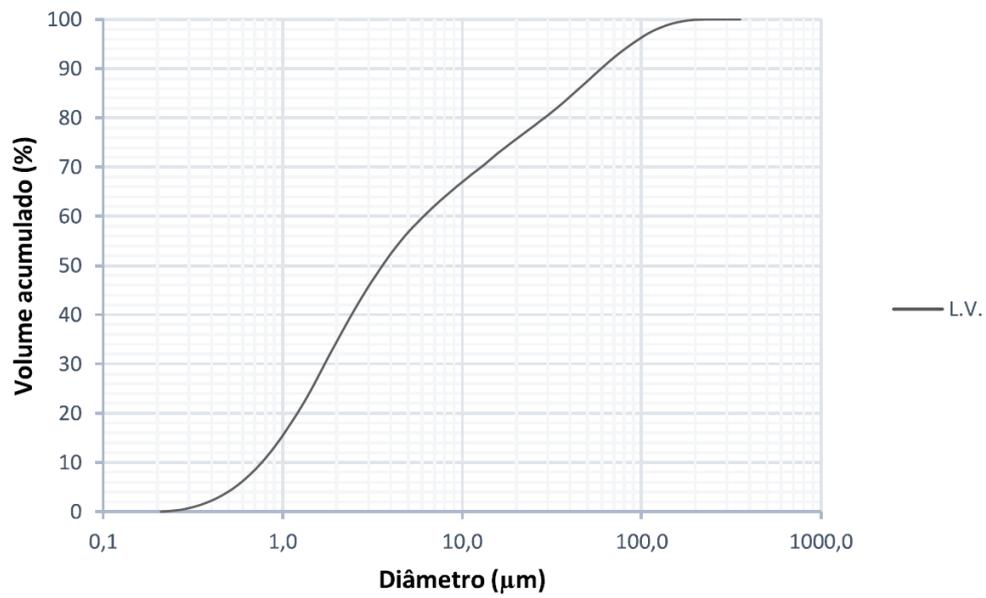


Figura 13 – Distribuição granulométrica de resíduos de bauxita provenientes de São Luís, MA. Fonte: FERREIRA, 2019, p. 25.

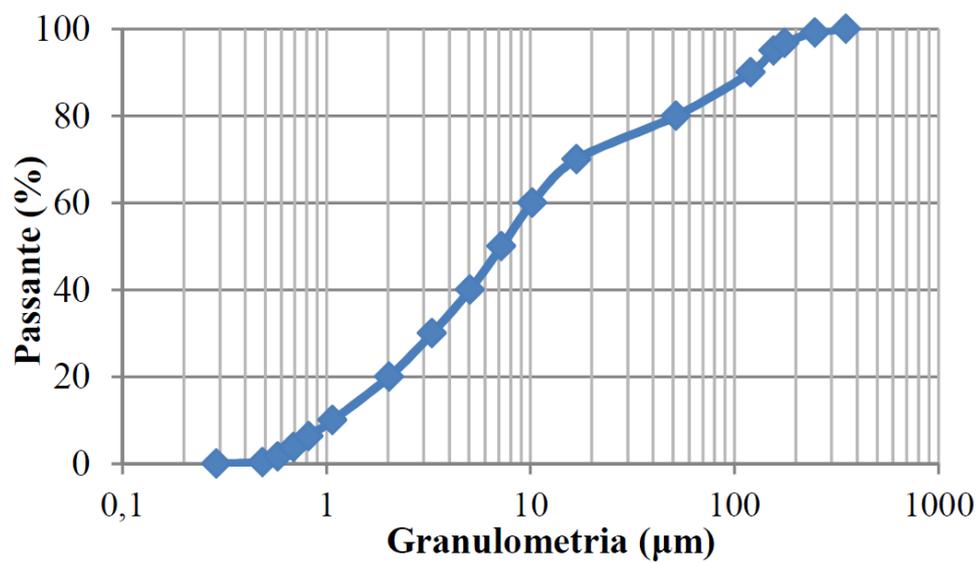


Figura 14 – Distribuição granulométrica de resíduos de bauxita provenientes de Barcarena, PA. Fonte: LIMA, 2015, p. 109.

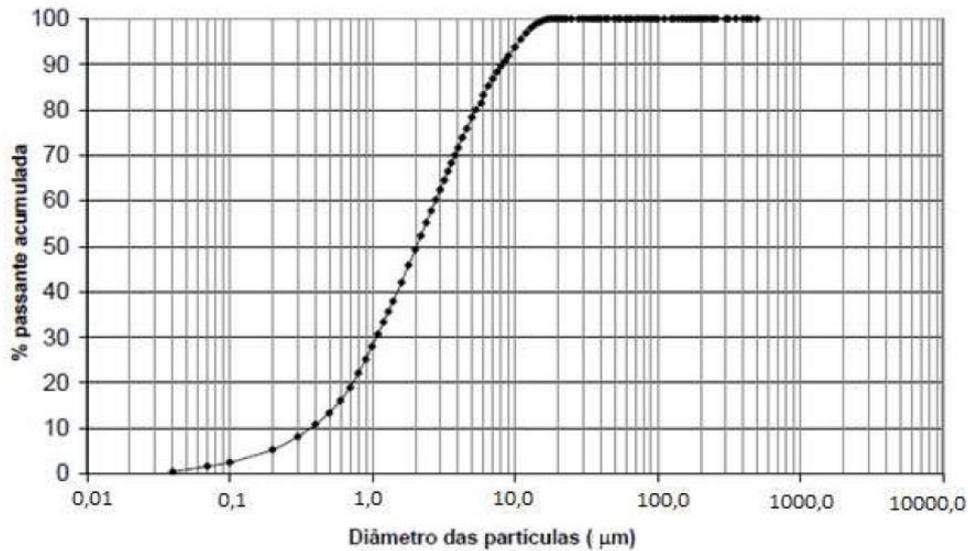


Figura 15 – Distribuição granulométrica dos resíduos de bauxita provenientes de Poços de Caldas, MG. Fonte: MANFROI, 2009, p. 92; GARCIA, 2012, p. 47.

Na Figura 16, são mostradas as distribuições granulométricas de resíduos de refino de bauxita provenientes de várias partes do mundo. Em vista do apresentado, Reddy *et al.* (2021) estabelecem que o valor mediano para o diâmetro médio de partícula para a lama vermelha varia entre os 5 μm e os 10 μm, uma vez que os tamanhos de partículas da LV variam bastante, podendo ir desde grãos do tamanho de grãos de areia grossos até partículas do tamanho de grãos finos de argila, menores que 1 μm, com a predominância da fração arenosa (grossa) variando de 1 a 50%. Com isso em vista, Reddy *et al.* (2021) destacam, ainda, que Banvoelgyi *et al.* (2010) e Evans (2016) frisam que algumas refinarias de bauxita separam as partículas mais grossas de lama vermelha das partículas mais finas desse resíduo, ao passo que outras refinarias não o fazem.

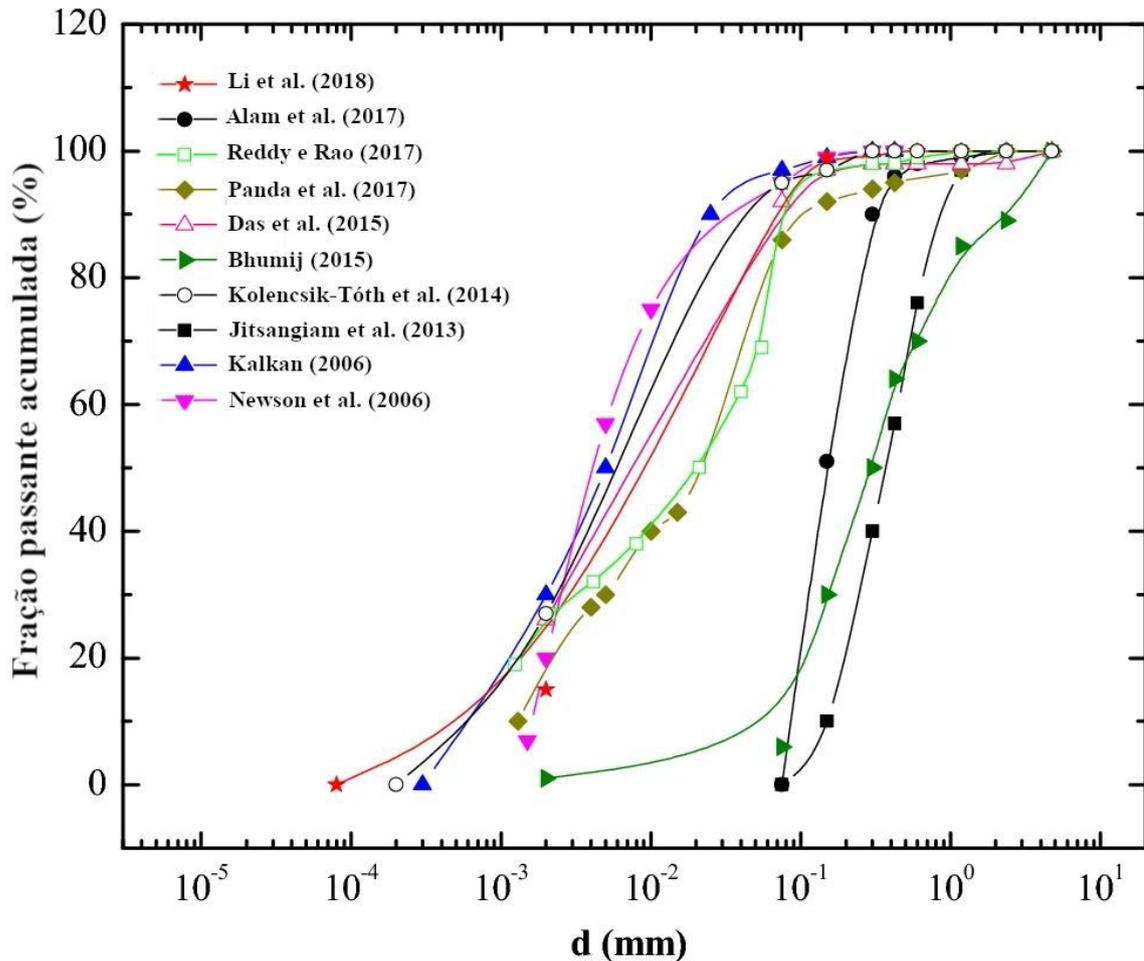


Figura 16 – Distribuições granulométricas de resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo.

Fonte: Adaptado de REDDY *et al.*, 2021.

No entanto, tendo em vista, os resultados das análises de granulometria de resíduos de bauxita provenientes de refinarias brasileiras, mostrados na Tabela 2 e nas Figuras 12-15, apenas o diâmetro médio de partícula dos resíduos de bauxita provenientes de Barcarena se encaixam na faixa de valores medianos para o D_{50} estabelecida por Reddy *et al.* (2021). Mesmo assim, a predominância de partículas finas nas bauxitas provenientes de São Luís e Poços de Caldas pode ser explicada pelo fato de que a predominância destas partículas se deve à dissolução de minerais que ocorrem durante o refino, bem como a alterações físicas nos RB provocadas pela moagem da bauxita ao início do Processo Bayer, conforme constatado por Alam *et al.* (2017) e Donoghue *et al.* (2014).

Entretanto, Reddy *et al.* (2021) ressalta que a moagem por si só não é suficiente para produzir resíduos de bauxita com uma predominância de apenas partículas finas, com diâmetro menor ou igual a 10 μm , uma vez que a dissolução de um mineral pode liberar várias partículas

finas, com diâmetros menores que 10 μm , o que faz com que seja correto afirmar que a grande maioria da fração de partículas finas de resíduos de bauxita está intimamente ligada às associações minerais presentes na bauxita originária da lama vermelha.

Além disso, os resultados apresentados pelo estudo realizado por Newson *et al.* (2006) corroboram o ponto de vista a respeito das causas da predominância de partículas finas em resíduos de bauxita, apresentado por Reddy *et al.* (2021), com os autores do estudo de 2006 constatando que houve uma redução no tamanho das partículas dos resíduos resultantes do refino de bauxita quando estes foram lavados em meio ácido.

Ademais, Reddy *et al.* (2021) também destacaram que Pradhan *et al.* (1996) relataram a existência de variações nos tamanhos de partícula de RB, com estes tamanhos variando de 0,01 a 200 μm , atribuindo estas variações à qualidade do minério e às técnicas de separação empregadas pela refinaria, corroborando assim, um dos pontos de vista apresentados por Miura (2016), no qual o autor determina às causas de variação dos diâmetros de partícula da lama vermelha resultante do refino de bauxita.

Reddy *et al.* (2021) também atribuem as variações de tamanho dos resíduos resultantes do refino da bauxita ao tipo de processo de refino adotado na refinaria, destacando que Wang e Liu (2012) constataram que os resíduos de bauxita resultantes do Processo Bayer possuem partículas de diâmetros menores quando comparados com os resíduos de bauxita resultantes do Processo de Sinterização, com os RB resultantes do Processo de Sinterização analisados, possuindo diâmetros de partícula que variam de 0,7 a 100 μm , e um diâmetro médio de partícula igual a 28,5 μm , ao passo que os resíduos de bauxita resultantes do Processo Bayer analisados possuíam diâmetros de partícula na faixa 0,8-50 μm , com um diâmetro médio de partícula igual a 14,8 μm .

Fuller e Richardson (1986) demonstraram, também, que o método de estocagem dos resíduos de bauxita podem influenciar na sua textura, sendo esta uma característica física dos resíduos de bauxita que é definida pela distribuição de tamanhos de partícula desses resíduos. Conforme pode ser visto na Figura 17, os resultados do trabalho conduzido por Sousa *et al.* (2017), cujos objetivos eram verificar e classificar as variações granulométricas da lama vermelha através da sedimentação gravitacional, e construir uma análise comparativa a partir da Lei de Stokes e com ensaios por granulômetro a laser, visando futura aplicação em compósitos de matriz polimérica, confirmam essa teoria, demonstrando que as distribuições de tamanho de partícula dos resíduos de bauxita variam de acordo com o número de camadas no

qual o resíduo é empilhado, sendo esta variação decorrente dos efeitos da compactação da lama vermelha.

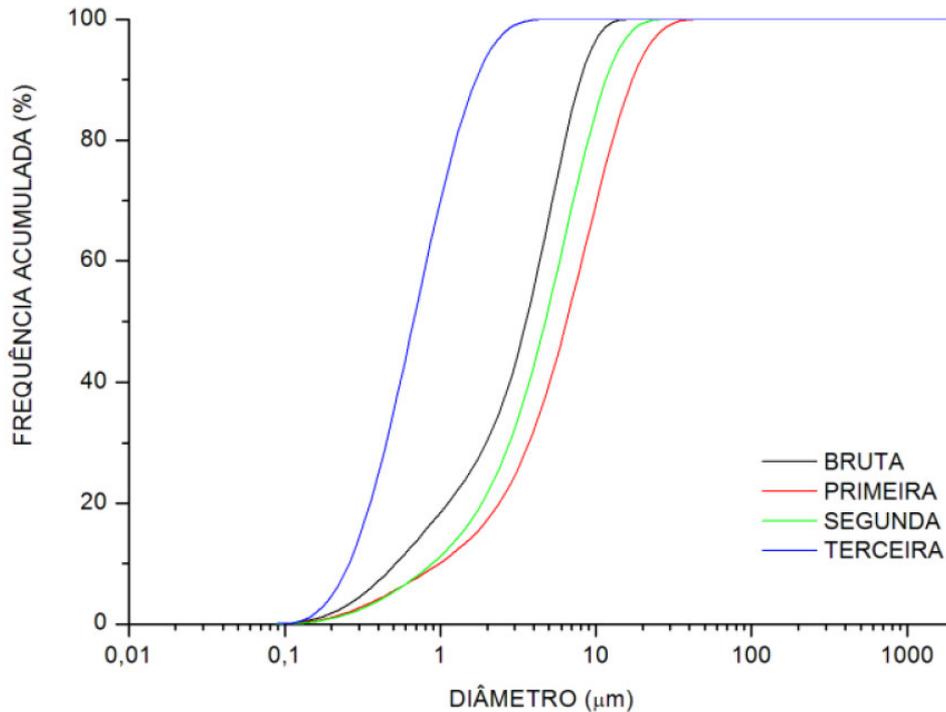


Figura 17 – Resultados de ensaios de granulometria a laser para LV empilhada em várias camadas por meio de sedimentação gravitacional. Fonte: SOUSA *et al.*, 2017.

Na Tabela 3, são mostrados os resultados das análises texturais de vários resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do Brasil e do mundo. Conforme pode ser visto nessa tabela, a maioria das partículas constituintes dos resíduos resultantes do refino da bauxita possuem tamanhos de partícula comparáveis aos tamanhos dos grãos de silte e de argila. Além disso, estudos realizados por Banvoelgyi *et al.* (2010), Wagh (1987) e Wehr *et al.* (2006) constataram que algumas amostras de lama vermelha analisada possuíam uma fração de partículas finas, com diâmetros comparáveis aos de grãos de argila, maiores que 50%.

Tabela 3 – Resultados de estudos de análise textural de resíduos de bauxita ao redor do mundo

Localidade	Referências	% Areia (20-2000 µm)	% Silte (2-20 µm)	% Argila (<2 µm)
Austrália – Gove, NT	Wehr <i>et al.</i> (2006)	13	40	47
Austrália – Kwinana, WA	Wong (1990)	30	30	40
Brasil – Alumínio, SP	Antunes <i>et al.</i> (2010)	6,37	57,8	35,8
Brasil – Barcarena, PA	Miura (2016)	15	54	31
Brasil – Poços de Caldas, MG	Manfroi (2009)	0	95	5
Brasil – São Luís, MA	Ferreira (2019)	24	42	34
Canadá	Fortin e Karam (1998)	13	47	36
China	Li <i>et al.</i> (2018)	5	75	20
Espanha	Rubinos <i>et al.</i> (2015)	12	50	38
Estados Unidos – Louisiana	Gore <i>et al.</i> (2016)	36	44	20
Estados Unidos – Texas	Wong (1990)	8	66	26
Índia – Damanjodi, OR	Panda <i>et al.</i> (2017); Reddy e Rao (2018); Alam <i>et al.</i> (2017); Kola e Das (2013).	5-15	43-76	22-35
Índia – Renukoot, UP	Sundaram e Gupta (2010);	40-45	30-35	5-14

	Alam <i>et al.</i> (2017); Kushwaha e Kishan (2016).			
Índia – Muri, JH	Sundaram e Gupta (2010); Alam <i>et al.</i> (2017); Kushwaha e Kishan (2016).	17	51	32
Jamaica	Wagh (1987); Gräfe <i>et al.</i> (2011); Gray e Somogyi (1974).	20-30	50	20-30
Reino Unido	Newson <i>et al.</i> (2006)	0	80	20

8.2.2 Densidade

A densidade dos resíduos de bauxita varia conforme condições físicas como a textura, porosidade, presença de matéria orgânica e a forma de disposição do resíduo, com este parâmetro físico da LV possuindo um valor médio de $2,5 \pm 0,7 \text{ g.cm}^{-3}$. (MIURA, 2016; NGUYEN; BOGER, 1998).

Segundo Miura (2016), a comparação da densidade dos resíduos de bauxita entre alguns estudos pode ser problemática devido ao fato de alguns autores falharem ao não especificar sob quais condições de umidade a densidade superficial do resíduo foi medida.

Reddy *et al.* (2021) destacam que a densidade dos resíduos de bauxita é um reflexo das condições físicas do local de origem ao qual a lama vermelha foi submetido, corroborando dessa forma, o ponto de vista apresentado por Miura (2016) a respeito dos fatores que influenciam a densidade dos resíduos de bauxita ao redor do mundo.

Conseqüentemente, a densidade dos resíduos de bauxita ao redor do mundo varia bastante, com os valores deste parâmetro físico da lama vermelha variando na faixa entre 1,6 g.cm⁻³ e 3,7 g.cm⁻³ (KLAUBER *et al.*, 2011; MIURA, 2016; REDDY *et al.*, 2021).

Ao se fazer uma comparação com solos naturais, Reddy *et al.* (2021) destacam que Terzaghi *et al.* (1996) e Kumar *et al.* (2020) demonstraram que a densidade de solos naturais varia na faixa 2,65-2,75 g.cm⁻³, com a lama vermelha, sendo em média mais densa, o que se deve à presença de fases metálicas, especialmente, fases ricas em ferro na lama vermelha proveniente do refino da bauxita. A Tabela 4, a seguir, mostra dados referentes às densidades de resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo.

Tabela 4 – Densidades de lamas vermelhas ao redor do mundo

Localidade	Referências	Densidade (g.cm⁻³)
Brasil – Alumínio, SP	Nery (2013)	2,797
Brasil – Barcarena, PA	Bezerra <i>et al.</i> (2010); Lima (2015); Silva (2020).	2,609-2,996
Brasil – Poços de Caldas, MG	Manfroi (2009)	2,710
Brasil – São Luís, MA	Bedin (2010); Mercury <i>et al.</i> (2010); Ferreira (2019); Siviero (2019).	2,710-3,620
China	Li <i>et al.</i> (2018)	2,770
Espanha	Rubinos <i>et al.</i> (2015)	3,440
Estados Unidos – Louisiana	Gore <i>et al.</i> (2016)	3,200-3,700
Índia – Damanjodi, OR	Panda <i>et al.</i> (2017); Reddy e Rao (2018); Alam <i>et al.</i> (2017); Kola e Das (2013).	2,850-3,450
Índia – Renukoot, UP	Sundaram e Gupta (2010); Alam <i>et al.</i> (2017); Kushwaha e Kishan (2016).	2,850-2,970

Índia – Muri, JH	Sundaram e Gupta (2010); Alam <i>et al.</i> (2017); Kushwaha e Kishan (2016).	3,270
Jamaica	Wagh (1987); Klauber <i>et al.</i> (2011); Gray e Somogyi (1974).	2,700-3,700
Reino Unido	Newson <i>et al.</i> (2006)	3,050

8.2.3 Superfície específica (S_e)

As propriedades de superfície são fundamentais para diversas áreas de pesquisa associadas à catálise, cromatografia, deposições em superfícies (em particular, fenômenos de sorção), etc (COSTENARO *et al.*, 2010). Segundo Costenaro *et al.* (2010), esse parâmetro de superfície de materiais sólidos tem sido usualmente obtido pelo método BET, método este desenvolvido por Brunnauer, Emmet e Teller (1938). Este procedimento utiliza a adsorção de um gás, usualmente nitrogênio, e equações provenientes do processo de adsorção identificado pelo procedimento BET que fornece como resultado a área superficial específica (COSTENARO *et al.*, 2010). Na Tabela 5, a seguir, são mostrados dados de superfície específica para resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo.

Tabela 5 – Resultados de estudos de determinação de superfície específica de resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo

Localidade	Referências	S_e ($m^2.g^{-1}$)
Arábia Saudita	Russkikh <i>et al.</i> (2020)	12,000
Brasil – Alumínio, SP	Antunes <i>et al.</i> (2012)	21,600
Brasil – Barcarena, PA	Lima (2015)	13,228
Brasil – São Luís, MA	Mercury <i>et al.</i> (2010)	12,960
Espanha	Rubinos <i>et al.</i> (2015)	23,700

Índia – Damanjodi, OR	Panda <i>et al.</i> (2017); Reddy e Rao (2018); Alam <i>et al.</i> (2017); Kola e Das (2013).	20,400-47,200
-----------------------	---	---------------

8.2.4 Peso específico seco (γ_d) e teor de umidade (w)

De acordo com Reddy *et al.* (2021), o peso específico seco e o teor de umidade dos resíduos de bauxita são propriedades mecânicas desses resíduos industriais, sendo também, consideradas como propriedades de compactação desses resíduos, uma vez que estas propriedades dos RB são determinadas pelas características de compactação do resíduo.

Assim como a densidade e a distribuição de tamanho de partícula, essas propriedades da lama vermelha são definidas pela mineralogia da bauxita originária desse resíduo, pelas características operacionais do processo de refino utilizado na planta, além da forma de disposição desses resíduos na ADRB, visto que o peso específico seco e o teor de umidade propriedades mecânicas dos resíduos de bauxita que está ligada ao teor de umidade desses resíduos. O peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo dos resíduos de bauxita são parâmetros indicativos do grau máximo de compactação desses resíduos e são obtidos através de ensaios de compactação Proctor Normal. Segundo Silva (2020), esses ensaios são realizados para se obter as curvas de compactação do RB, indicar a massa específica ou densidade aparente e o teor de umidade referente, a fim de se estabelecer a densidade máxima e, conseqüentemente, o peso específico máximo, além do teor de umidade ótimo, sendo esses parâmetros indicados pelo ponto de inflexão da curva de compactação do resíduo.

Siviero (2019) aponta que os ensaios de compactação são realizados em níveis crescentes de umidade, em moldes cilíndricos com dimensões específicas, sendo estes ensaios normalizados pela norma ABNT NBR 7182:2016.

A Figura 18, a seguir, mostra um exemplo de curva de compactação de resíduos de bauxita, sendo esta uma curva de compactação obtido para resíduos de bauxita provenientes de Barcarena, PA.

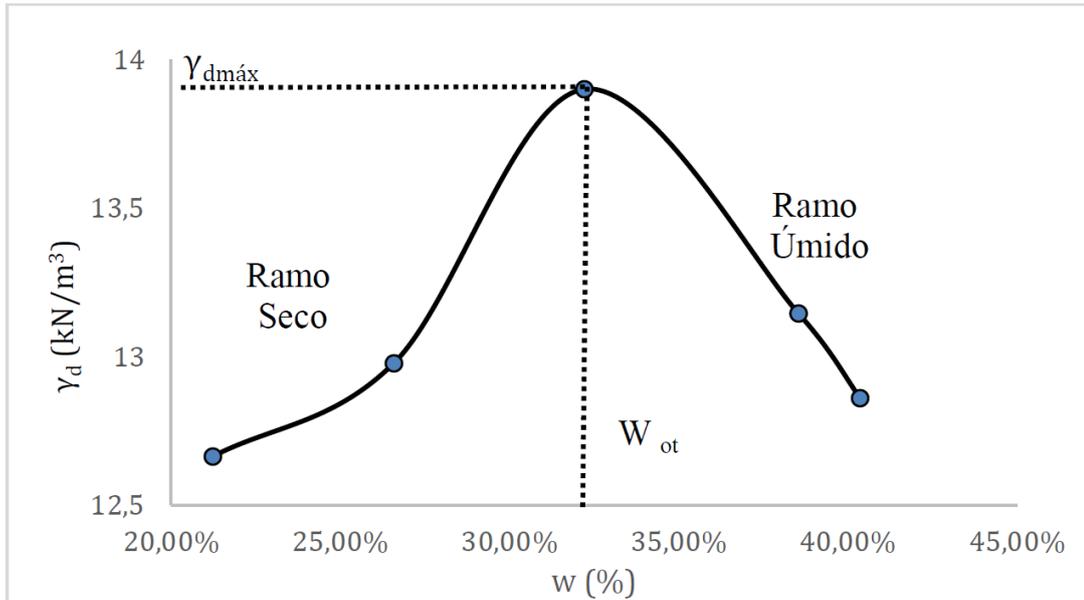


Figura 18 – Curva de compactação de resíduo de bauxita proveniente de Barcarena, PA. Fonte: SIVIERO, 2019, p. 49.

Conforme visto na Figura 18, durante os ensaios de compactação do resíduo de bauxita analisado, a curva de compactação da lama vermelha vai sendo construída à medida que a umidade do material vai sendo aumentada. Além disso, a curva de compactação, obtida por Siviero (2019) e mostrada na Figura 18, indica que foi obtido um peso específico seco máximo de $13,89 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ e um teor de umidade ótimo igual $32,22\%$ para o resíduo de bauxita proveniente de Barcarena, PA.

A Figura 19, a seguir, mostra as curvas de compactação para os resíduos de bauxita provenientes de Alumínio, SP, obtidas por Nery (2013). Além disso, na Figura 20, são mostradas as curvas de compactação para resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo, compiladas por Reddy *et al.* (2021), ao passo que, na Tabela 6, são mostrados resultados de ensaios mecânicos de compactação realizados com resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo.

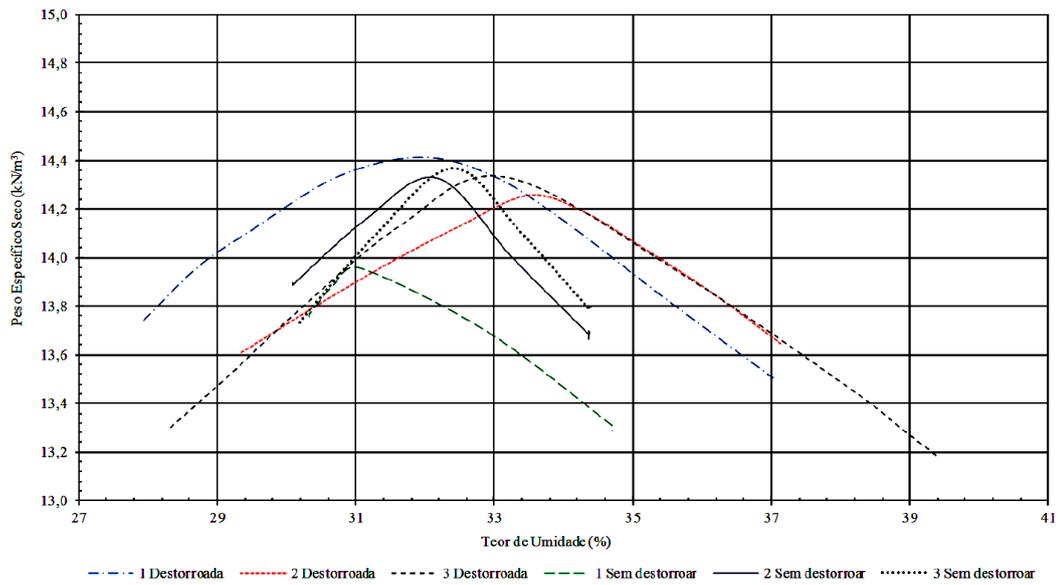


Figura 19 – Curvas de compactação para amostras de resíduo de bauxita provenientes de Alumínio, SP. Fonte: NERY, 2013, p. 64.

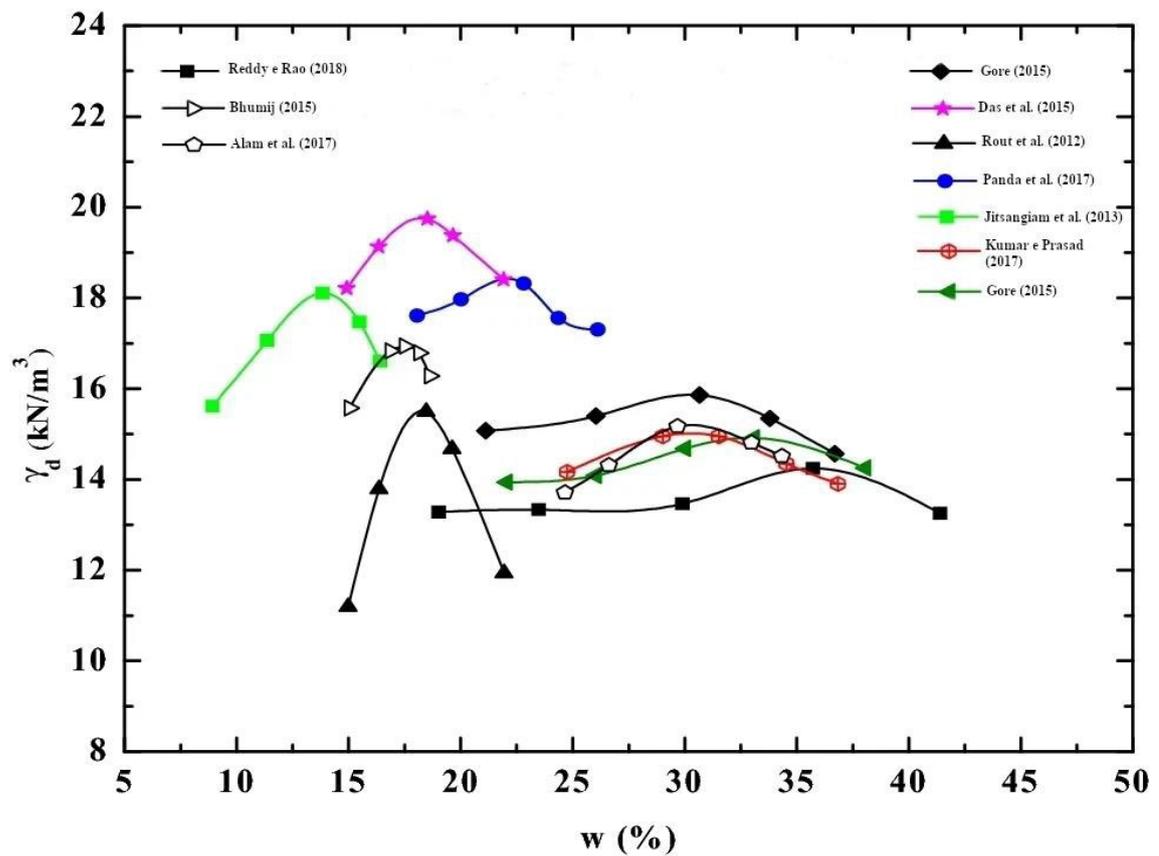


Figura 20 – Curvas de compactação de resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo. Fonte: Adaptado de REDDY *et al.*, 2021.

Tabela 6 – Resultados de ensaios de compactação de resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo

Localidade	Referências	γ_{dmax} (kN.m ⁻³)	w _{ot} (%)
Brasil – Alumínio, SP	Nery (2013)	14,33	33,00
Brasil – Barcarena, PA	Siviero (2019); Silva (2020)	13,89-15,17	27,30-32,22
Brasil – São Luís, MA	Bedin (2010)	11,00	19,50
China	Li <i>et al.</i> (2018)	17,00	50,15
Espanha	Rubinos <i>et al.</i> (2015)	16,90	7-35
Estados Unidos – Louisiana	Gore <i>et al.</i> (2016)	15,50	30,00
Índia – Damanjodi, OR	Panda <i>et al.</i> (2017); Reddy e Rao (2018); Alam <i>et al.</i> (2017); Kola e Das (2013).	12,50-37,00	22,00-34,00
Índia – Renukoot, UP	Sundaram e Gupta (2010); Alam <i>et al.</i> (2017); Kushwaha e Kishan (2016).	14,50-16,40	33,00

8.2.5 Índice de compressão (c_c) e coeficiente de adensamento (c_v)

O índice de compressão e o coeficiente de adensamento dos resíduos de bauxita são definidos por Reddy *et al.* (2021) como propriedades de consolidação da lama vermelha

proveniente do refino de bauxita. Estes parâmetros dizem respeito à característica de compressibilidade dos resíduos provenientes do refino da bauxita. Marangon (2018) define a compressibilidade como a propriedade que todos os materiais têm de sofrer deformação quando submetidos a forças externas.

A lama vermelha, assim como outros resíduos de mineração, possui características de compressibilidade similares às dos solos naturais. Dessa forma, os resíduos provenientes do refino de bauxita podem ser definidos como sistemas particulados compostos de partículas sólidas e espaços vazios, os quais podem estar parcialmente ou totalmente preenchidos com água. As deformações nos solos e, conseqüentemente, nos resíduos de bauxita, segundo Marangon (2018), podem ser atribuídas, de forma genérica, a três fatores a saber:

- Compressão das partículas sólidas;
- Compressão dos espaços vazios dos RB, com a conseqüente expulsão de água no caso de os resíduos estarem saturados;
- Compressão da água (ou do fluido) existente nos vazios dos resíduos.

Marangon (2018) explicita que para os níveis de tensões usuais aplicadas na engenharia de solos, as deformações que ocorrem na água e nos grãos sólidos são desprezadas, uma vez que estes materiais são incompressíveis. Dessa forma, calcula-se as deformações volumétricas dos resíduos de bauxita a partir da variação do índice de vazios, sendo este parâmetro uma função da variação das tensões efetivas aplicadas ao material.

Dentre os parâmetros de compressibilidade dos resíduos provenientes do refino de bauxita, que são extensivamente estudados por pesquisadores cujos estudos são voltados à análise de propriedades geotécnicas desses resíduos industriais, visando a aplicação da lama vermelha em projetos de Engenharia Civil e o Engenharia Geotécnica estão justamente o índice de compressibilidade e o coeficiente de adensamento, sendo os valores destes parâmetros obtidos a partir da realização de ensaios de compressibilidade dos resíduos de bauxita analisados. Marangon (2018) mostra como são realizados os ensaios de compressibilidade dos solos e de materiais sólidos com características similares às dos solos naturais.

O estudo de compressibilidade dos solos e de materiais porosos com características similares (como a lama vermelha) é normalmente efetuado utilizando-se um equipamento chamado edômetro, que foi desenvolvido por Terzaghi para o estudo da compressibilidade e da taxa de compressão do solo com o tempo. O ensaio de

compressão edométrica (também referido como ensaio de compressão confinada ou ensaio de adensamento) é o mais antigo e mais conhecido para a determinação de parâmetros de compressibilidade do solo (e de materiais porosos com características similares). O ensaio consiste na compressão de uma amostra do material, compactada ou indeformada, pela aplicação de valores crescentes de tensão vertical, sob a condição de deformação radial nula. O ensaio é realizado mantendo-se a amostra saturada (se for o caso) e utilizando duas pedras porosas (uma no topo e outra na base) de modo a acelerar a velocidade dos recalques na amostra e, conseqüentemente, diminuir o tempo de ensaio, sendo que durante cada carregamento, são efetuadas leituras dos deslocamentos verticais do topo da amostra e do tempo (MARANGON, 2018).

Atualmente, os ensaios de adensamento unidimensional para a determinação das propriedades de consolidação ou parâmetros de compressibilidade dos solos e materiais porosos com características similares são padronizados pela norma ABNT NBR 16853:2020 (ABNT-NBR, 2020). Nas Figuras 21 e 22, a seguir, são mostrados um esquema de um edômetro utilizado para ensaios de compressão confinada e as condições de contorno para estes ensaios de obtenção dos parâmetros de compressibilidade de materiais porosos com características similares ao solo, ao passo que na Tabela 7 são mostrados resultados de ensaios de compressão confinada realizados com amostras de resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo.

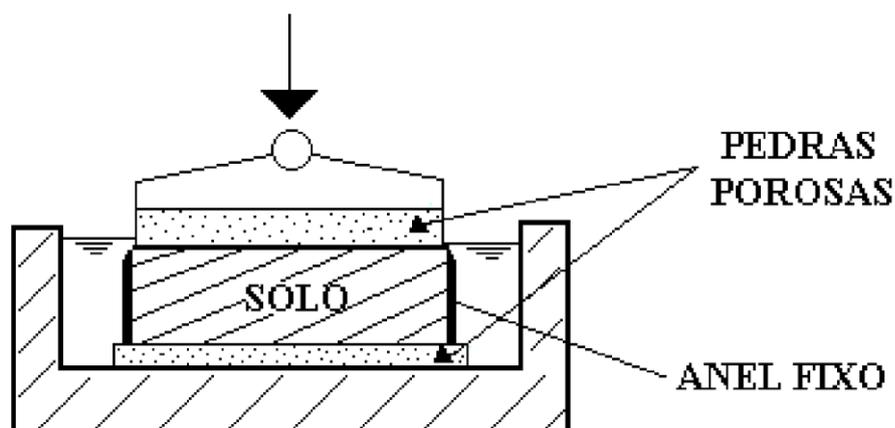


Figura 21 – Esquema de edômetro utilizado em ensaios de compressão confinada. Fonte: MARANGON, 2018,

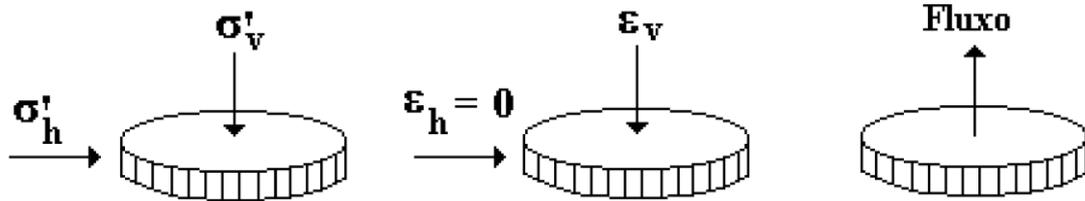


Figura 22 – Condições de contorno para realização de ensaios de compressão confinada. Fonte: MARANGON, 2018, p. 65.

Tabela 7 – Resultados de ensaios de compressão confinada realizados com resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo

Localidade	Referências	c_c	c_v ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
Brasil – Alumínio, SP	Nery (2013)	0,13-0,32	$3,270 \times 10^{-6}$ – $9,161 \times 10^{-5}$
Brasil – Barcarena, PA	Silva (2020)	0,30-0,65	$3,81 \times 10^{-3}$ – $6,73 \times 10^{-2}$
Brasil – São Luís, MA	Bedin (2006); Bedin (2010).	0,14-0,24	0,06-0,60
Estados Unidos – Louisiana	Gore <i>et al.</i> (2016)	0,28-0,38	-
Índia – Damanjodi, OR	Panda <i>et al.</i> (2017); Reddy e Rao (2018); Alam <i>et al.</i> (2017); Kola e Das (2013).	0,0933	3×10^{-3} - 5×10^{-2}
Jamaica	Wagh (1987); Klauber <i>et al.</i> (2011); Gray e Somogyi (1974).	0,268	$7,5 \times 10^{-4}$ - 3×10^{-2}
Reino Unido	Newson <i>et al.</i> (2006)	0,41	-

8.2.6 Condutividade hidráulica (k)

A permeabilidade é uma das propriedades mais importantes para a seleção de geomateriais a serem utilizados como paredes de sistemas de disposição de resíduos industriais ou como material de cobertura desses sistemas (RUBINOS *et al.*, 2015).

De acordo com Daniel (1993), baixas condutividades hidráulicas podem ser obtidas através da compactação do material poroso até pesos específicos mais altos, ou através do enchimento dos poros com materiais finos, conforme descrito por Kalkan (2006) e Rubinos *et al.* (2015).

Além disso, outro parâmetro importante que influencia na condutividade hidráulica de um determinado material é o seu índice de vazios (REDDY *et al.*, 2021). Segundo Reddy *et al.* (2021), a lama vermelha possui mais de 95% de suas partículas na forma de frações finas (<0,0075 mm), sendo que estas partículas finas podem drasticamente reduzir a condutividade hidráulica da lama vermelha, agindo como um partículas preenchedoras dos espaços dos poros.

De acordo com Marangon (2018), os ensaios para obtenção da condutividade hidráulica de um determinado material poroso, com características similares às dos solos, se assemelham aos ensaios para a obtenção das propriedades de adensamento, uma vez que são conduzidos com o material a ser analisado, dentro de uma célula de adensamento, localizada em um equipamento denominado permeâmetro de carga variável. Siviero (2019) descreve da seguinte forma como são realizados os ensaios de permeabilidade de carga variável para fins de determinação da condutividade hidráulica de materiais com características similares às dos solos naturais.

O ensaio é realizado em etapas, onde as cargas são dobradas a cada 24 horas, sendo estes estágios de carga divididos em 8 etapas, onde as cargas aplicadas variam de 0,25 a 32 kg, correspondentes às tensões de 12 a 1400 kPa na amostra. Neste ensaio, o volume d'água que percola através da amostra é de pequena quantidade. Dessa forma, são realizadas leituras, em cada estágio de carregamento, do nível de água na bureta graduada acoplada à célula de adensamento e da temperatura da água no dispositivo de adensamento. (SIVIERO, 2019)

Siviero (2019) detalha da seguinte forma os pormenores do ensaio de permeabilidade a carga variável para obtenção da condutividade hidráulica de materiais porosos com propriedades semelhantes às dos solos naturais.

A célula de adensamento do perímetro de carga variável possui um registro de fechamento que permite o bloqueio da circulação de água entre a amostra e a bureta acoplada à célula. Para a realização do procedimento dos ensaios de permeabilidade de carga variável, primeiramente, adiciona-se água ao permeâmetro até atingir o nível máximo, que é equivalente ao topo da amostra, observando-se a área para que não haja presença de ar em seu interior, realizando-se então, o fechamento do registro. Em seguida, adiciona-se água à bureta graduada até que seja atingida uma altura de coluna d'água desejada. Para finalizar, o registro é aberto, iniciando-se o ensaio de adensamento, e então, por meio da graduação da bureta, são feitas as leituras das alturas de coluna d'água para os tempos estipulados para cada etapa do adensamento. De posse dos tempos obtidos, é possível determinar a condutividade hidráulica da amostra. (SIVIERO, 2019)

Explicada a forma como é obtida a condutividade hidráulica da lama vermelha, a Tabela 8 mostra os resultados de ensaios de permeabilidade carga variável conduzidos com resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo, sendo mostrados nessa tabela os valores de condutividade hidráulica obtidos para os respectivos RB.

Tabela 8 – Resultados de ensaios de permeabilidade de carga variável conduzidos com resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo

Localidade	Referências	k (cm.s ⁻¹)
Brasil – Alumínio, SP	Nery (2013)	$3,567 \times 10^{-8} - 4,032 \times 10^{-5}$
Brasil – Barcarena, PA	Silva (2020)	$2,48 \times 10^{-5}$
Brasil – São Luís, MA	Bedin (2010)	$1,14 \times 10^{-6} - 4,45 \times 10^{-4}$
China	Li <i>et al.</i> (2018)	$4,5 \times 10^{-6}$
Estados Unidos – Louisiana	Gore <i>et al.</i> (2016)	$1,4 - 6,7 \times 10^{-6}$

Índia – Damanjodi, OR	Panda <i>et al.</i> (2017); Reddy e Rao (2018); Alam <i>et al.</i> (2017); Kola e Das (2013).	$1,3 \times 10^{-9} - 5,832 \times 10^{-4}$
Índia – Renukoot, UP	Sundaram e Gupta (2010); Alam <i>et al.</i> (2017); Kushwaha e Kishan (2016).	$2 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-5}$
Índia – Muri, JH	Sundaram e Gupta (2010); Alam <i>et al.</i> (2017); Kushwaha e Kishan (2016).	$8,7 \times 10^{-5} - 5,3 \times 10^{-4}$
Jamaica	Wagh (1987); Klauber <i>et al.</i> (2011); Gray e Somogyi (1974).	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-5}$
Reino Unido	Newson <i>et al.</i> (2006)	$2 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-6}$

8.2.7 Coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ)

A coesão e o ângulo de atrito interno são propriedades dos resíduos de bauxita que são consideradas como propriedades de resistência ao cisalhamento. Segundo Reddy *et al.* (2021), ao se propor o uso de algum tipo de solo ou resíduo industrial como geomaterial para aplicações práticas, especialmente na construção civil, o material deve exibir propriedades adequadas de resistência ao cisalhamento, de modo a cumprir com as normas relativas às suas aplicações na construção civil, definidas por cada país.

Estudos conduzidos por Das *et al.* (2015), Wang e Liu (2012), Reddy *et al.* (2021), e Newson *et al.* (2006) mostraram que a lama vermelha proveniente do refino da bauxita possui capacidades de manter bons níveis de resistência à compressão, mesmo sob elevados níveis de alcalinidade, com um comportamento similar a solos arenosos ou argilosos.

Nesse contexto, Reddy *et al.* (2021) destacam que Jain (2014) e Panda *et al.* (2017), ao medirem a resistência à compressão não-confinada da lama vermelha não-tratada, obtiveram resultados que indicaram que esse parâmetro de propriedade mecânica do resíduo proveniente

do refino de bauxita está na faixa de 150 a 250 kPa, o que é relativamente baixo, fazendo assim, com que a resistência à compressão não-confinada da lama vermelha se aproxime mais do mesmo parâmetro para um solo argiloso de média plasticidade.

Além disso, Reddy *et al.* (2021) também apontam que Sundaram e Gupta (2010) realizaram testes de penetração que permitiram com que os mesmos chegassem à conclusão de que o comportamento mecânico da lama vermelha se assemelha ao de solos macios, e que Rubinos *et al.* (2015) destacam que a lama vermelha seca pode apresentar uma resistência ao cisalhamento razoavelmente alta, muito por conta de mudanças na morfologia de suas partículas.

Reddy *et al.* (2021) destacam ainda que Vogt. (1974) relatou que a força de cisalhamento não-drenada da lama vermelha é similar à da argila não-cimentada, com alguns autores na literatura destacando que altas resistências ao atrito na lama vermelha se devem à textura e à morfologia das partículas desse resíduo industrial.

Nesse contexto, Reddy *et al.* (2021) destacam que Jitsangiam e Nikraz (2013) relataram um alto teor de quartzo (SiO_2) na bauxita proveniente de Darling Range, na Austrália, e na lama vermelha resultante do refino dessa bauxita, com o quartzo existindo nesses materiais como partículas angulares, o que se torna vantajoso para a lama vermelha, uma vez que, nessas condições, esse material passa a ter patamares mais altos de resistência ao cisalhamento. A Tabela 9, a seguir, mostra dados de propriedades de resistência ao cisalhamento para resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo.

Tabela 9 – Dados de propriedades de resistência ao cisalhamento para resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo

Localidade	Referências	c (kPa)	ϕ (°)
Brasil – Alumínio, SP	Nery (2013)	-	8,5-33,0
Brasil – Barcarena, PA	Silva (2020)	26	29
Brasil – São Luís, MA	Bedin (2006); Bedin (2010).	14,4-35,0	32-36
China	Li <i>et al.</i> (2018)	11-35	28-33

Estados Unidos – Louisiana	Gore <i>et al.</i> (2016)	-	30-35
Índia – Damanjodi, OR	Panda <i>et al.</i> (2017); Reddy e Rao (2018); Alam <i>et al.</i> (2017); Kola e Das (2013).	7-28	34-42
Índia – Renukoot, UP	Sundaram e Gupta (2010); Alam <i>et al.</i> (2017); Kushwaha e Kishan (2016).	10-20	26-28
Jamaica	Wagh (1987); Klauber <i>et al.</i> (2011); Gray e Somogyi (1974).	-	37-45
Reino Unido	Newson <i>et al.</i> (2006)	10-20	38-42

Como pode ser observado na Tabela 9, o ângulo de atrito interno da lama vermelha é bastante variável, podendo ser desde um ângulo pequeno até um ângulo consideravelmente alto, variando desde 8,5° até os 45°. Estes dados corroboram o ponto de vista mostrado por Arora (2019) que destaca que embora a lama vermelha seja categorizada como um material que exibe características de baixa a alta plasticidade, este ainda pode ter ângulos de atrito interno que se assemelham aos da areia, que são ângulos com valores de ϕ na faixa 26-45°.

Por outro lado, Reddy *et al.* (2021) explicitam que a maioria dos trabalhos científicos na literatura disponível indicam valores de coesão na faixa 7-20 kPa para os resíduos de bauxita, o que analisando os dados mostrados na Tabela 9, é um indicativo de que alguns parâmetros dos ensaios de resistência ao cisalhamento, sendo estes ensaios de compressão triaxial, podem afetar os valores dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno da lama vermelha. Conforme demonstrado por Nery (2013), os principais fatores que influenciam os resultados dos ensaios de compressão triaxial são o grau de compactação e o teor de umidade das amostras de resíduos de bauxita.

Com isso, Reddy *et al.* (2021) concluem que há uma dependência do ângulo de atrito interno com as partículas grandes de RB do tamanho de partículas de areia, bem como com as suas morfologias, o que segundo Reddy *et al.* (2021), validam ainda mais os resultados dos estudos conduzidos por Alam *et al.* (2017) que avaliaram a esfericidade das partículas de lama vermelha, principalmente das frações mais grossas ou arenosas, e postularam que a resistência ao atrito aumenta à medida que se aumenta a esfericidade das partículas de LV, bem como dos estudos conduzidos por Srivastava (1997) que mediu a coesão e a resistência ao cisalhamento da lama vermelha e obteve resultados na faixa de 1,77 a 7,7 kPa para a coesão e 29-131 kPa para a resistência ao cisalhamento das amostras de lama vermelha analisadas.

Além disso, Reddy *et al.* (2021) destacam que Newson *et al.* (2006) determinaram as propriedades de secagem de lamas vermelhas puras, carbonatadas e cristalizadas, comparando as propriedades de secagem desses resíduos com variações sazonais dessas propriedades ao longo do verão e do inverno, tendo Newson *et al.* (2006) constatado que a LV carbonatada apresentou uma baixa resistência ao cisalhamento, tendo este parâmetro um valor de 20 kPa, após 37 dias sendo estocada por empilhamento a seco, ao passo que a resistência ao cisalhamento durante o verão foi ainda mais baixa, muito por conta do maior teor de umidade dos RB analisados, causado pelo aumento da pluviosidade durante essa estação do ano.

Por fim, Reddy *et al.* (2021) destacam que estudos conduzidos por Reddy e Rao (2018), Newson *et al.* (2006) e, Reddy e Rao (2016) comprovaram que pode ocorrer perda de resistência ao cisalhamento quando a lama vermelha é exposta a ambientes ácidos.

8.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

8.3.1 pH

De acordo com Venancio (2013) e Alam *et al.* (2018), o pH é uma das propriedades químicas mais importantes de um material, uma vez que esta propriedade diz muito a respeito das propriedades de equilíbrio químico do material em questão. Estes autores se baseiam no ponto-de-vista defendido por Gräfe *et al.* (2011), no qual defendem que o pH é variável-mestra de uma reação química, uma vez que a maioria das reações químicas são dependentes do pH de uma determinada solução.

Kirwan *et al.* (2013) destacam que os resíduos provenientes do refino da bauxita são materiais altamente alcalinos, com sua alcalinidade resultando da retenção de carbonato e

aluminato de sódio na fase líquida ou na superfície da lama vermelha, antes da sua disposição, o que se dá devido à lavagem incompleta dos RB após a digestão da bauxita com soda cáustica.

Isso corrobora os resultados dos estudos conduzidos por Thornber e Binet (1999), no qual os autores lavaram sequencialmente os resíduos de bauxita com água, a fim de promover uma hidrólise dos compostos iônicos presentes na LV, e mostraram que a liberação de íons sódio, aluminato, carbonato e hidroxila estava relacionada com a alcalinidade total da solução extraída após a lavagem, com os íons sendo liberados a partir de PDS e o peso dos sólidos diminuindo após sucessivos lavagens, porém com o pH e a concentração de íons permanecendo inalterada na solução.

Dessa forma, Thornber e Binet (1999) constatam, de acordo com as observações de seu estudo, foi estabilizado em um patamar alcalino pela sua fase sólida e somente foi alterado quando os sólidos foram removidos.

De acordo com Gräfe *et al.* (2009) e Tabereaux (2019), o pH da lama vermelha resultante do refino da bauxita varia na faixa de 9,5 a 13,0, possuindo este parâmetro químico dos RB um valor médio de $11,3 \pm 1,0$. A Tabela 10, a seguir, mostra o pH de diferentes soluções de resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo.

Tabela 10 – Dados de pH de diferentes soluções de resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do mundo

Localidade	Referências	pH
Brasil – Barcarena, PA	Lima (2015)	10,25
Brasil – Poços de Caldas, MG	Manfroi (2009)	11,30
Brasil – São Luís, MA	Rivas Mercury <i>et al.</i> (2010)	12,90
Espanha	Rubinos <i>et al.</i> (2015)	10,20
Estados Unidos – Louisiana	Gore <i>et al.</i> (2016)	13,10-13,50
Índia – Damanjodi, OR	Panda <i>et al.</i> (2017); Reddy e Rao (2018); Alam <i>et al.</i> (2017); Kola e Das (2013).	10,70-11,50

Índia – Muri, JH	Sundaram e Gupta (2010); Alam <i>et al.</i> (2017); Kushwaha e Kishan (2016).	11,53
Índia – Renukoot, UP	Sundaram e Gupta (2010); Alam <i>et al.</i> (2017); Kushwaha e Kishan (2016).	10,20-11,00
Jamaica	Wagh (1987); Klauber <i>et al.</i> (2011); Gray e Somogyi (1974).	11,25-12,50
Reino Unido	Newson <i>et al.</i> (2006)	11,60

Conforme pode ser visto na Tabela 10 e, de acordo com os resultados dos estudos conduzidos por Pan *et al.* (2017) e Bai *et al.* (2006), a lama vermelha possui um pH muito maior que o de vários resíduos industriais, como as cinzas volantes (pH=5,5), porém comparável aos de outros resíduos industriais, como a escória proveniente da fabricação do aço (pH entre 10,6 e 12,9), entre outros resíduos.

Além disso, Reddy *et al.* (2021) destacam que o pH é uma importante característica química que influencia no comportamento de decantação de resíduos industriais, com os autores destacando que, geralmente, uma variação de pH pode acelerar ou retardar o processo de decantação de uma determinada solução, a depender da concentração e da composição química da suspensão.

Nesse contexto, vale destacar que Reddy *et al.* (2018) apontaram que a presença de grandes quantidades de partículas finas na lama vermelha não é favorável, uma vez que as partículas finas presentes nos RB são suscetíveis a sofrerem dispersão na solução de lama vermelha, nas condições naturais de pH desse material.

Um estudo que corrobora o fato apresentado anteriormente é o estudo conduzido por Reddy e Rao (2018), no qual os autores, ao investigarem as características de decantação da lama vermelha tratada com soluções de ácido clorídrico (HCl) e cloreto de sódio (NaCl), constataram que, quando comparado com o tempo de decantação da LV não-tratada, o tempo de decantação da solução de RB tratada com HCl foi maior por conta de uma maior dissolução

ou dissipação das partículas de RB, caracterizada por um aumento do número de partículas finas desses resíduos, ao passo que o tempo de decantação da solução de RB tratada com NaCl foi menor por conta de ter havido uma maior agregação das partículas sólidas de resíduos de bauxita. Os mesmos autores puderam afirmar que o tratamento ácido dos resíduos de bauxita leva a um aumento do teor e, conseqüentemente, da dispersão de partículas finas, o que leva a aumento na duração do tempo de decantação, e que a o tipo de solução aquosa, bem como o pH de uma determinada substância afeta o seu comportamento de decantação. Por fim, corroboram os resultados dos trabalhos de pesquisa obtidos por Abel *et al.* (1994) e Martinez (2012), nos quais os autores investigaram respectivamente os comportamentos de diversas suspensões coloidais e de suspensões de celulose, e constataram que pH alto causa uma maior repulsão das partículas carregadas negativamente, explicando assim, a dispersão de partículas da lama vermelha.

8.3.2 Capacidade de neutralização ácida (CNA)

No contexto da neutralização de resíduos industriais alcalinos, Reddy *et al.* (2021) ressaltam que é indispensável levar em consideração a capacidade tamponante do resíduo industrial em questão, além da redução dos seus níveis de alcalinidade de modo a cumprir com as normas e legislações ambientais vigentes no território de operação de cada refinaria.

Nesse contexto, entra em cena uma importante propriedade química de resíduos industriais, dependente do pH, que é a capacidade de neutralização. Esta propriedade pode ser ácida ou básica, a depender do pH do resíduo industrial em questão. No caso da lama vermelha, que possui um pH alcalino, esta propriedade é ácida, pois segundo Venancio (2013), a capacidade de neutralização ácida é a propriedade química que diz respeito à quantidade de ácido mineral necessária para que se reduza o pH de um determinado material até um valor específico de pH.

Venancio (2013) destaca, ainda que Carter *et al.* (2008) mostraram que as curvas de CNA da lama vermelha variam de acordo com a refinaria de origem do RB em questão, conforme pode ser visto na Figura 23, tendo estas curvas sido obtidas a partir de dados obtidos durante análises de CNA de resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes da Austrália.

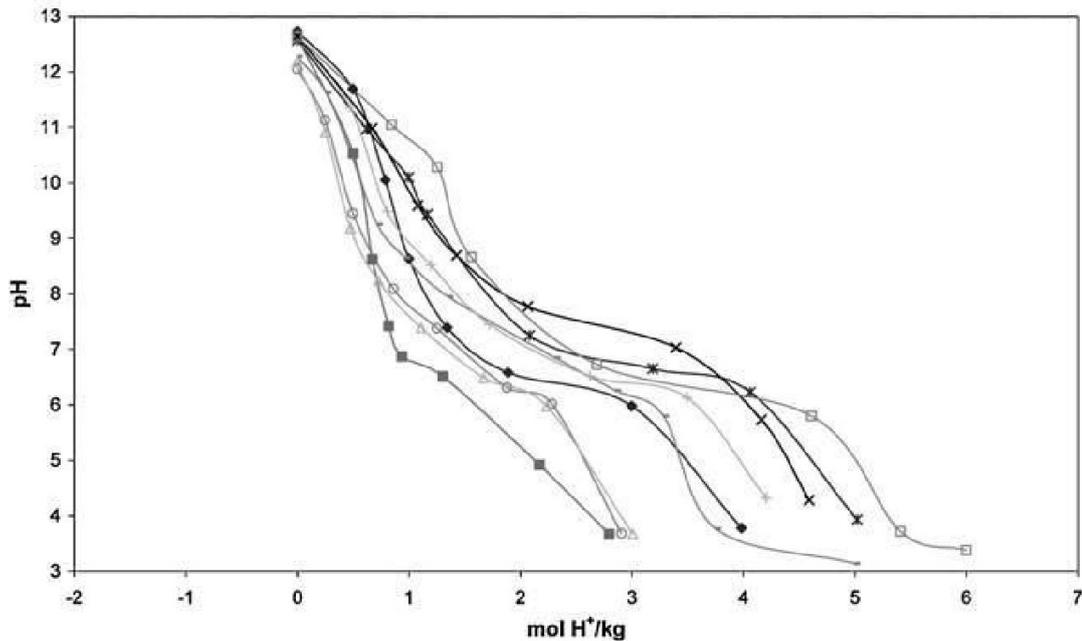


Figura 23 – Curvas de capacidade neutralização ácida de resíduos de bauxita provenientes de nove diferentes refinarias da Austrália. Fonte: CARTER *et al.*, 2008, p. 480.

Conforme pode ser visto na Figura 23, a capacidade de neutralização ácida para o pH 7 dos resíduos de bauxita analisados por Carter *et al.* (2008) foi de 1,0 a 3,5 mol H⁺.kg⁻¹. Venancio (2013) destaca, ainda, que os pontos de inflexão das curvas de CNA para um determinado material alcalino são indicativos da completude da dissolução de minerais e de que uma nova fase assume o papel de estabilização do material em questão.

Com base nos resultados dos estudos conduzidos por Liu *et al.* (2007) e Thornber e Hughes (1986), Venancio (2013) aponta que à medida que se aumenta o intervalo de adição de alíquotas de ácido à lama vermelha, a variação de pH também aumenta, o que torna a curva de CNA deste resíduo industrial dependente do tempo de equilíbrio.

Além disso, também baseado nos resultados dos trabalhos de pesquisa conduzidos por Liu *et al.* (2007) e Thornber e Hughes (1986), Venancio (2013) apontou que quando não são limitadas pela difusão, a reação de neutralização da fase líquida da lama vermelha é instantânea, ao passo que as reações de neutralização da fase sólida desse resíduo industrial obedecem às taxas de dissolução dos sólidos. O mesmo autor indica que o processo de neutralização dos resíduos de bauxita é bastante complexo, controlado por múltiplos sólidos, por diversas reações que interagem entre si, além de serem dependentes da velocidade de adição de ácido, sendo as curvas de CNA dos RB, conseqüentemente, diferentes daquelas dos minerais puros.

Em face disso, Reddy *et al.* (2021) ressaltam que é obrigatório reduzir os níveis de alcalinidade da lama vermelha, visto que a alta alcalinidade desse resíduo industrial afeta a mobilidade dos elementos químicos presentes nesse material, além de impedir que aconteçam reações químicas de neutralização das partículas da lama vermelha quando este resíduo é remediado com substância estabilizantes. Além disso, destacam nos estudos feitos por Babu (2018) que o pH da lama vermelha deve ser mantido em aproximadamente 8, de modo a se obter um equilíbrio químico para os elementos desse resíduo industrial, além de eliminar os impactos ambientais causados pela disposição inadequada do resíduo.

Ademais, Reddy *et al.* (2021) dão luz ao fato de que estudos disponíveis na literatura, tendo estes sido conduzidos por Tuazon e Corder (2008), Palmer e Frost (2009), Khaitan *et al.* (2009), Khaitan *et al.* (2010), Cusack *et al.* (2018), Barrow (1982), Courtney *et al.* (2009) e Patel *et al.* (2018), demonstraram que os resíduos provenientes do refino de bauxita podem ser neutralizados por água marinha, CO₂ (por meio de carbonatação), gesso, cinzas volantes, e até mesmo, esterco de vaca.

Khaitan *et al.* (2010) e Venancio (2013) concordam que a neutralização de resíduos de bauxita por carbonatação é uma ótima forma de reduzir o pH desses resíduos industriais de modo a tornar mais segura a disposição dos mesmos.

Em seus estudos, Khaitan *et al.* (2010) conseguiram reduzir, de 12,5 para 9,5, por meio de neutralização com CO₂ (carbonatação), o pH da lama vermelha americana analisada, com uma redução ainda maior do pH desse resíduo sendo realizada para o valor de 8,3 através da revegetação da pilha de resíduos de bauxita analisada.

Venancio (2013), por sua vez, conseguiu apenas através de carbonatação, uma redução, de 13,2 para 8,7, do pH da lama vermelha analisada, proveniente de Barcarena, Pará. Dessa forma, é correto afirmar que uma eficiência de neutralização de RB por carbonatação maiores que as obtidas por Khaitan *et al.* (2010), representando assim, um grande avanço no tratamento de resíduos de bauxita por meio de carbonatação.

Por fim, Reddy *et al.* (2021) destacam que Clark *et al.* (2015) constataram que o tratamento da lama vermelha, proveniente do refino da bauxita, com soluções salinas, ricas em íons cálcio (Ca²⁺) ou magnésio (Mg²⁺), especialmente as soluções de aluminato tricálcico, contribuiu para reduzir a atividade de íons alumínio (Al³⁺), o que conseqüentemente ajudou a inibir a dissolução dos íons cálcio na solução alcalina, levando assim, a uma melhor regulação do pH da solução resultante.

8.3.3 Composição química

Conforme mostrado anteriormente, a composição química dos resíduos provenientes do refino da bauxita varia de acordo com a composição química da bauxita de origem, que por sua vez, é definida por aspectos mineralógicos e geológicos dos locais de origem do minério. Ainda assim, o Instituto Internacional do Alumínio (2020) conseguiu elencar dados de composição típica da lama vermelha, em termos de óxidos presentes neste resíduo industrial, em suas respectivas faixas de composição típica, a partir de dados disponíveis na literatura. Os dados de composição típica da lama vermelha ao redor do mundo, elencados pelo IAI, são mostrados a seguir, na Tabela 11.

Tabela 11 – Composição típica dos resíduos de bauxita ao redor do mundo

Composto	Teor (% p.)
Fe ₂ O ₃	5-60
Al ₂ O ₃	5-30
TiO ₂	0-15
CaO	2-14
SiO ₂	3-50
Na ₂ O	1-10

Fonte: Adaptado de IAI, 2020.

A seguir, nas Tabelas 12 e 13, é possível observar a variação da composição química da lama vermelha de país para país, ao passo que, na Tabela 14, é possível observar essa variação de acordo com o estado brasileiro de origem da refinaria. As perdas ao fogo (PF), que são materiais orgânicos presentes nos resíduos de bauxita que se precipitam na forma gasosa durante a calcinação dos resíduos na temperatura padrão de teste de 1050°C são, também, indicadas nas Tabelas 13 e 14 (Instituto Internacional do Alumínio, 2020).

Tabela 12 – Faixas de composição típica da lama vermelha em alguns países do mundo

País	Composição típica (% p)				
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Na ₂ O
Austrália	23,00-36,20	17,10-30,00	13,00-54,00	1,00-8,30	0,40-11,00
Brasil	23,98-50,77	6,80-13,50	0,60-3,40	7,80-10,90	0,40-1,50
Canadá	45,00-55,00	15,00-25,00	4,00-15,00	5,00-15,00	2,00-10,00
China	5,00-9,00	6,40-9,20	20,50-25,90	2,90-7,30	2,40-3,20
Estados Unidos	30,40-55,60	11,13-16,20	2,56-11,14	0,01-10,11	1,50-9,00
França	45,00-53,00	10,00-16,00	5,00-8,00	9,00-15,00	3,00-5,00
Grécia	39,30-48,00	15,60-16,90	6,90-9,20	4,80-7,10	2,40-3,30
Índia	24,50-54,80	14,80-24,30	6,20-7,30	13,50-18,00	3,30-5,30
Jamaica	26,30-54,40	2,10-8,20	0,00-2,00	10,90-13,30	0,00-1,10
Rússia	43,49-50,00	11,20-21,51	8,72-9,04	2,92-4,05	3,81-7,09
Turquia	37,60-39,80	17,30-20,20	15,20-17,10	4,10-4,90	7,10-12,10

Fonte: Adaptado de XUE *et al.* (2016); ANTUNES *et al.* (2012); MAGALHÃES (2012); EID (2015); SHINZATO *et al.* (2015); MANFROI (2009); RIVAS MERCURY *et al.* (2010); FERREIRA (2019); POULIN *et al.* (2008); PARAMGURU *et al.* (2005); BARCA *et al.* (2021); LI (2001); RASPOPOV *et al.* (2013).

Tabela 13 – Composições químicas de resíduos de bauxita proveniente de outros países do mundo

País	Referência	Composição química (% p)											
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	V ₂ O ₅	PF
Alemanha	Keller <i>et al.</i> (2020)	35,30	15,70	14,00	8,90	11,40	-	6,70	-	-	-	-	-
Coréia do Sul	Choe <i>et al.</i> (2019)	22,80	16,10	38,80	10,00	2,40	0,20	3,40	-	-	-	-	0,24
Espanha	Rubinos <i>et al.</i> (2015)	37,22	12,40	3,81	4,64	20,10	0,14	6,30	0,05	0,06	0,51	-	11,34
Guiné	Traoré <i>et al.</i> (2017)	25,22	9,87	7,58	6,62	3,03	0,17	2,71	0,34	0,10	0,02	-	-
Holanda	Taye <i>et al.</i> (2021)	52,94	15,21	5,21	2,40	8,05	-	2,65	0,63	-	-	-	10,77
Hungria	Kolencsik-Tóth <i>et al.</i> (2014)	31,63	10,50	12,20	6,09	5,90	0,53	11,66	0,05	0,34	0,55	-	-
Irã	Deihimi <i>et al.</i> (2018)	22,17	13,98	13,00	4,20	7,17	2,01	2,03	0,42	0,06	0,16	-	9,55
Irlanda	Atasoy (2005)	30,40	23,60	9,65	5,30	17,85	Traços	6,40	Traços	Traços	Traços	Traços	6,5

Itália	Mombelli <i>et al.</i> (2019)	20,89	16,30	9,80	10,39	5,20	0,15	5,54	0,08	0,05	0,15	0,10	29,78
Japão	Shimano e Koga (1979)	45,50	20,60	4,00	3,20	8,40	-	4,00	-	-	-	-	-
Reino Unido	Newson <i>et al.</i> (2006)	36,31	23,43	18,25	12,36	5,97	0,03	4,38	0,20	0,14	-	-	-
Romênia	Dobra <i>et al.</i> (2015)	44,60	18,16	7,50	6,87	3,16	0,16	3,66	0,15	0,03	-	-	15,2
Suriname	Paramguru <i>et al.</i> (2005)	24,81	19,00	11,90	9,29	12,15	-	-	-	-	-	-	-
Taiwan	Paramguru <i>et al.</i> (2005)	41,30	20,21	17,93	3,80	2,90	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 14 – Composições químicas de resíduos de bauxita provenientes de diferentes partes do Brasil

Localidade	Referência	Composição química (% p)											
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	V ₂ O ₅	PF
Alumínio, SP	Antunes <i>et al.</i> (2012)	27,04	22,87	19,19	8,01	2,98	0,04	2,17	-	0,16	-	-	-

Barcarena, PA	Magalhães (2012)	29,54	22,54	17,24	12,51	4,56	0,15	1,08	0,03	-	-	0,28	12,04
Barcarena, PA	Eid (2015)	50,77	3,19	22,36	13,45	6,36	-	2,13	0,10	0,13	-	0,09	-
Ouro Preto, MG	Shinzato <i>et al.</i> (2015)	27,10	21,70	16,60	8,92	4,49	-	4,33	0,84	0,57	0,40	0,04	13,40
Poços de Caldas, MG	Manfroi (2009)	23,98	32,22	21,90	9,32	3,14	-	3,70	2,40	0,47	0,55	0,28	-
São Luís, MA	Rivas Mercury <i>et al.</i> (2010)	31,22	20,77	14,37	9,87	4,55	3,92	2,49	0,20	-	-	-	12,61
São Luís, MA	Ferreira (2019)	40,31	19,44	15,08	7,50	3,85	-	0,69	-	0,03	0,09	0,11	-

Apresentadas as composições químicas típicas dos resíduos de bauxita ao redor do mundo, é correto afirmar que mesmo que as composições desses resíduos variem de acordo com os seus locais de origem, estes materiais possuem elementos típicos de sua composição. Segundo Gräfe *et al.* (2009), os elementos mais abundantes nos resíduos de bauxita são, em ordem decrescente de abundância, ferro, silício, titânio, alumínio, cálcio e sódio, sendo que, em média, 70% dos RB consistem em fase cristalina, ao passo que os outros 30% consistem em fase amorfa. Por fim, Miura (2016) estabelece que os principais ânions presentes nas soluções de resíduos de bauxita são:

- Hidroxila (OH^-);
- Carbonato (CO_3^{2-});
- Hidrogenocarbonato (HCO_3^-);
- Aluminato [$\text{Al}(\text{OH})_4^-$];
- Dihidrogeno-ortossilicato ($\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$);
- Trihidrogeno-ortossilicato (H_3SiO_4^-).

8.3.4 Salinidade

Esta propriedade química dos resíduos provenientes do refino da bauxita é dependente da sua composição química e, segundo Miura (2016), é geralmente mensurada pela sua condutividade elétrica. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, os solos são normalmente classificados como salinos quando sua condutividade elétrica ultrapassa os 4 dS.m^{-1} (EMBRAPA, 2018). De acordo com Woodward (2008), em resíduos de bauxita a condutividade elétrica se encontra na faixa 30-40 dS.m^{-1} .

Miura (2016) estabelece que a falta de agregação estrutural, a cimentação e a formação de poeira na camada superficial do RB são algumas características associadas à presença elevada de íons sódio (Na^+), que por sua vez, proporcionam uma elevada condutividade elétrica aos resíduos. Além disso, Miura (2016) destaca que estudos conduzidos por Fuller *et al.* (1982) demonstraram que as concentrações de Na^+ em soluções de lama vermelha podem alcançar valores de 17 a 200 mmol.L^{-1} , excedendo de 2 a 4 vezes as concentrações de íons cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), demonstrando assim, que os carbonatos de cálcio e magnésio possuem baixa solubilidade em soluções com pH maior que 10.

Por fim, Summers (1996) estabelece que a sodicidade de um determinado material poroso com características similares às dos solos naturais é determinada pelo seu percentual de sódio trocável (PST) ou por sua taxa de absorção de sódio (TAS). Segundo Miura (2016), os solos são classificados como sódicos quando possuem um PST maior que 15% ou uma TAS maior que 13.

9 APLICAÇÕES DOS RESÍDUOS DE BAUXITA NA INDÚSTRIA QUÍMICA

9.1 ABSORÇÃO E ADSORÇÃO

9.1.1 Considerações gerais

Absorção e adsorção são operações unitárias conhecidas como fenômenos de sorção, sendo estes fenômenos definidos como fenômenos decorrentes das interações entre determinadas substâncias que podem ocorrer na superfície ou no interior de outras.

Sposito (2008) define a sorção como a remoção de determinados compostos de uma solução para a fase sólida, com Thompson e Goyne (2012) completando essa definição, destacando o termo “sorção” é geralmente utilizado em situações nas quais não se conhece o mecanismo de remoção de um determinado componente para a fase sólida de uma solução, podendo este mecanismo ser a absorção, adsorção ou precipitação.

Thompson e Goyne (2012) destacam, ainda, que as espécies químicas envolvidas nos fenômenos de sorção são conhecidas como sorvente e sorbato, sendo o sorvente o constituinte principal da fase sólida de uma sorção e pode ser chamado de absorvente ou adsorvente caso se conheça o mecanismo de sorção, enquanto o sorbato, por sua vez, são os íons ou moléculas que se acumulam no sólido sorvente durante uma sorção.

Villa-Vélez (2020) destaca, ainda, que é geralmente possível classificar os fenômenos de sorção em dois tipos principais, sendo estes a sorção química ou quimissorção e, a sorção física ou fisissorção. Villa-Vélez (2020) explica da seguinte maneira como ocorrem os dois tipos de sorção supracitados.

A fisissorção ocorre por meio de forças intermoleculares, podendo estas ser dipolos permanentes, dipolos induzidos, interações quadrupolo entre sorvente e sorbato,

forças de Van der Waals, ou forças de valência secundária. A quimissorção, por outro lado, envolve interações químicas entre o sorvente e o sorbato, sendo estas duas espécies ligadas por forças de valência que são as mesmas que ligam os átomos em uma molécula (VILLA-VÉLEZ, 2020).

Thompson e Goyne (2012) explicitam que a principal diferença entre a absorção e a adsorção é que a absorção é o processo através do qual íons ou moléculas são removidos de uma solução, se acumulando na superfície e no interior do sorvente, ao passo que a adsorção envolve o mesmo processo de remoção de íons ou moléculas de uma determinada solução, porém com o acúmulo do sorbato somente na superfície do sorvente.

Cussler (2009) também explicita que enquanto o comportamento de um sistema de absorção pode ser previsto com base no seu equilíbrio químico, o comportamento de um sistema de adsorção dificilmente pode ser previsto com base no seu equilíbrio químico, devendo para isto, ser realizada uma análise experimental para a construção da isoterma de sorção do sistema.

Em um sistema de adsorção, o equilíbrio de fases dita apenas a capacidade de um adsorvente para um determinado adsorbato (VILLA-VÉLEZ, 2020). Com isso, Villa-Vélez (2020) defende que em sistemas simples, pode-se traçar uma curva de concentração do soluto na fase sólida em função da concentração do soluto na fase fluida. Estas curvas são dependentes da temperatura e são chamadas de isotermas de sorção (VILLA-VÉLEZ, 2020).

Com isso, Villa-Vélez (2020) reforça o ponto-de-vista defendido por Cussler (2009) ao defender que a construção, de forma experimental, da isoterma de sorção do sistema é a melhor forma de prever o comportamento desse sistema ao se realizar uma operação unitária de adsorção.

Por fim, Thompson e Goyne (2012) definem que a dessorção é o processo inverso da sorção, uma vez que a dessorção consiste na liberação de íons ou moléculas ligados, a um determinado sólido, em uma solução.

9.1.2 Zeólitas

As zeólitas são materiais complexos que consistem em silicatos cristalinos hidratados de estrutura aberta (GRECCO *et al.*, 2013). Segundo García Martínez e Pérez-Pariente (2003), a primeira zeólita, hoje conhecida como estilbita, foi descoberta em uma mina de cobre na

Suécia, no ano de 1756, pelo químico e mineralogista Axel Fredrik Crönstedt. De acordo com Grecco *et al.* (2013), esses minerais foram denominados zeólitas, nome de origem grega, composto pelas palavras *zeo* (ferver) e *lithos* (pedra), devido à sua capacidade de liberar água quando aquecidos.

Collins *et al.* (2020) relatam que, atualmente, existem cerca de 234 tipos diferentes de zeólitas, podendo estes minerais serem naturais ou sintéticos. Porém, conforme relatado por Grecco *et al.* (2013), hoje, o número de zeólitas naturais existentes, já catalogadas, já passa dos 60, sendo que algumas são encontradas com abundância na natureza.

Segundo Grecco *et al.* (2013), as zeólitas, como materiais cristalinos microporosos, têm se consolidado ao longo da segunda metade do século XX e do início do século XXI como importantes catalisadores em processos industriais de refino de petróleo, nas indústrias química e petroquímica, assim como em aplicações práticas de controle ambiental.

Cruz (2020) reforça esse ponto-de-vista, apontando que as zeólitas tem se tornado onipresentes na nossa vida moderna, com estes materiais sendo empregados em diversas aplicações, como refino de petróleo, tratamento de água, adsorção de gases, agricultura, aditivos na alimentação animal, química verde, entre outras aplicações.

De acordo com Collins *et al.* (2020), o mercado de zeólitas sintéticas, atualmente, é de aproximadamente US\$5,2 bilhões por ano, com este valor previsto para atingir os US\$5,9 bilhões por ano em 2023, sendo que os tipos de zeólitas sintéticas mais utilizados comercialmente são as zeólitas LTA, X, Y, USY e ZSM-5.

As primeiras pesquisas envolvendo síntese de zeólitas a partir de resíduos de bauxita foram feitas no Japão, no início da década de 1990. Nesse período, Kasai *et al.* (1992) relataram que estudos teóricos realizados na época já previam a possibilidade de zeólitas artificiais serem sintetizadas a partir do sobrenadante resultante da lixiviação ácida da lama vermelha feita com ácido sulfúrico. Os estudos conduzidos por Kasai *et al.* (1992) provaram essa possibilidade de forma experimental, com os autores obtendo sucesso na síntese de uma zeólita artificial, tendo a lama vermelha como principal matéria-prima.

Além disso, Kasai *et al.* (1994) também realizaram a síntese de zeólitas artificiais a partir do resíduo proveniente dos resíduos de bauxita, a fim de determinar suas entalpias de absorção de água e sintetizar outras zeólitas artificiais através de troca iônica, sendo esta uma

troca dos íons Na^+ , presentes nas zeólitas sintetizadas, por outros cátions presentes das suas respectivas soluções aquosas.

Nesse estudo a zeólita artificial sintetizada diretamente a partir da lama vermelha foi a zeólita Na-A, com a zeólita Mg-A, uma zeólita sintetizada a partir da troca dos íons Na^+ , presentes nas zeólitas Na-A, por íons de magnésio (Mg^{2+}), sendo a zeólita com a maior entalpia de absorção de água ($65,1 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), sendo dessa forma, considerada por Kasai *et al.* (1994) como a mais apropriada para ser utilizada como isolante térmica, uma vez que os autores desse estudo determinaram que essa aplicação das zeólitas artificiais sintetizadas pelos mesmos depende justamente da entalpia de absorção de água.

Em seguida, Kasai e Mizota (1996) fizeram um estudo no qual investigaram possíveis potenciais de aplicações da lama vermelha proveniente do refino da bauxita. Neste estudo, Kasai e Mizota (1996) propuseram que zeólitas podem ser sintetizadas a partir de RB para fins de tratamento de efluentes industriais altamente alcalinos.

Durante os anos 2000, não houve a realização de estudos envolvendo a síntese de zeólitas a partir de resíduos de bauxita, com os estudos de adsorção envolvendo RB, conduzidos nessa época, apenas investigando os usos dos resíduos puros como material adsorvente. Nessa época, apenas um estudo conduzido por Garau *et al.* (2007) relacionou os resíduos provenientes do refino de bauxita com zeólitas, sendo este um estudo comparativo das capacidades que os RB, uma zeólita natural e a cal possuem para adsorver metais pesados, como cádmio, chumbo e zinco, provenientes de um solo ácido poluído, e contaminado por estes metais.

Neste estudo, Garau *et al.* (2007) comprovaram que a lama vermelha foi o adsorvente mais eficaz em imobilizar os metais pesados contaminantes, de forma a melhorar as condições do solo analisado para fins de promoção do crescimento de bactérias fixadoras de nitrogênio, com o objetivo de melhorar a fertilidade do solo estudado, após a sua descontaminação.

Os estudos envolvendo zeólitas e resíduos de bauxita voltaram a todo vapor apenas durante a década de 2010, porém, apenas a partir da segunda metade da década mencionada, uma vez que durante a primeira metade dessa década foram publicados dois estudos relacionando resíduos de bauxita com zeólitas e apenas um estudo sobre a síntese de resíduos zeólitas a partir de resíduos de bauxita.

O primeiro destes dois estudos foi um estudo conduzido por López *et al.* (2011), no qual os autores investigaram e compararam as propriedades catalíticas da lama vermelha com

as da zeólita ZSM-5 na pirólise catalítica de resíduos plásticos. Neste estudo, López *et al.* (2011) obtiveram resultados que indicaram que a zeólita ZSM-5, por ter uma superfície específica maior que a da lama vermelha utilizada no estudo, possui uma eficiência catalítica maior que a da lama vermelha, fato este que não impede os RB de serem utilizados como catalisador da pirólise de resíduos plásticos, uma vez que a temperaturas um pouco mais altas, a LV alcança os mesmos níveis de eficiência catalítica da zeólita ZSM-5.

Wei *et al.* (2020) explicitam que as zeólitas ZSM-5 consistem de aluminossilicatos, com uma proporção A/S igual a um oitavo, que podem ser sintetizados a partir de um método hidrotérmico. Dessa forma, é correto afirmar que o método de síntese hidrotérmica de zeólita ZSM-5, definido por Wei *et al.* (2020), corrobora o fato de que se pode inferir que os estudos conduzidos por López *et al.* (2011) lançaram as bases teóricas para o uso de resíduos de bauxita na síntese de zeólitas ZSM-5, uma vez que demonstrando que a lama vermelha e a zeólita ZSM-5 possuem níveis de eficiência catalítica similares para a pirólise de resíduos plásticos, autores de estudos subsequentes já puderam ter uma base para avaliar as propriedades de zeólitas ZSM-5 sintetizadas a partir de RB, como matéria-prima substituta da alumina na síntese desta zeólita.

O estudo seguinte, conduzido por Shin *et al.* (2014), foi um estudo comparativo das capacidades de adsorção de metais pesados presentes em água do mar contaminada, por vários adsorventes. Os adsorventes testados foram lama vermelha, uma zeólita artificial sintetizada e comercializada por uma indústria química coreana, calcário e casca de ostra. Neste estudo, os adsorventes tiveram suas capacidades adsorptivas testadas para a remoção de íons de cromo (Cr^{3+}), níquel (Ni^{2+}), cobre (Cu^{2+}), zinco (Zn^{2+}), arsênio (As^{3+}), cádmio (Cd^{2+}) e chumbo (Pb^{2+}). Shin *et al.* (2014) constataram que mesmo a lama vermelha tendo uma superfície específica menor que a da zeólita ZSM-5, apresentando S_e de $26 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, comparada à S_e da zeólita ZSM-5 de $60 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, este material apresentou uma eficiência de adsorção maior que à da zeólita.

Com base nos resultados desse estudo, Shin *et al.* (2014) concluíram que a eficiência adsorptiva de um determinado adsorvente depende não apenas de sua superfície específica, mas sim, de outros fatores como o pH, a dose de adsorvente e o tempo de contato com o adsorbato.

O único estudo que aborda a síntese de zeólitas, com resíduos de bauxita como principal matéria-prima, feito durante a primeira metade da década de 2010, foi o estudo conduzido por Ma *et al.* (2014), no qual os autores realizaram a síntese de zeólita 4A cristalina a partir de resíduos de bauxita. Nesse estudo, Ma *et al.* (2014), obtiveram zeólitas 4A cristalinas de alta pureza, com estruturas bem definidas e que podem, segundo os autores, ser utilizadas

para remediação ambiental, especialmente para o tratamento de águas e solos poluídos. Além disso, Ma *et al.* (2014) informam que obtiveram um rendimento global de 38,43% para a obtenção de zeólita 4A a partir de RB, o que é caracteriza um bom rendimento, uma vez que a obtenção de zeólita 4A a partir da lama vermelha possui um caminho químico complexo, composto por três etapas.

Em seguida, Belviso *et al.* (2015) realizaram um estudo no qual realizaram, a baixas temperaturas, a síntese de uma zeólita 4A com propriedades magnéticas. As matérias-primas empregadas pelos autores para a síntese desta zeólita foram lama vermelha e cinzas volantes e, neste estudo, Belviso *et al.* (2015) demonstraram que zeólitas 4A magnéticas podem ser obtidas sem a adição de nanopartículas de óxido de ferro e que as propriedades magnéticas desta zeólita não influenciaram na sua capacidade de adsorção. Além disso, Belviso *et al.* (2015) provaram que mesmo altamente dispersas no adsorvente, as zeólitas magnéticas podem ser facilmente separadas através de separação magnética, com os autores afirmando que as zeólitas 4A magnéticas sintetizadas pelos mesmos possuem propriedades que permitem que as mesmas sejam empregadas em operações de adsorção, de modo a realizar uma remoção eficiente de metais pesados de águas contaminadas.

Em contrapartida aos estudos de Belviso *et al.* (2015), Xie *et al.* (2018) propuseram uma nova rota para a síntese de zeólitas magnéticas 4A para fins de remoção de vários metais pesados de uma vez só de vários adsorbatos diferentes. No estudo conduzido por Xie *et al.* (2018), o óxido de ferro presente na lama vermelha foi utilizado para a síntese da zeólita 4A com propriedades magnéticas e, as zeólitas 4A magnéticas exibiram excelentes propriedades de adsorção, especialmente de metais pesados como cádmio, chumbo, cobre, níquel e zinco, com as isotermas de adsorção destes metais pesados por parte da zeólita magnética sintetizada por Xie *et al.* (2018), baseadas nos modelos de Langmuir e Freundlich.

Dessa forma, os estudos conduzidos por Xie *et al.* (2018) comprovam que a rota de síntese da zeólita 4A magnética, a partir de resíduos provenientes do refino da bauxita, não interfere nas suas propriedades de adsorção, e nem na sua eficiência adsortiva, servindo dessa forma, como um complemento das informações levantadas pelo estudo conduzido por Belviso *et al.* (2015) acerca da síntese dessa zeólita.

Por conta do gálio (Ga) ser um metal que é considerado como matéria-prima crítica para a União Europeia, Ujaczki *et al.* (2019) desenvolveram e testaram um método de recuperação deste metal dos resíduos de bauxita, que se vale da lixiviação ácida da lama

vermelha, seguida da adsorção do gálio proveniente deste resíduo industrial, com zeólita HY como adsorvente.

Em seu estudo, Ujaczki *et al.* (2019) determinaram que o ácido oxálico foi o ácido mais eficiente, dentre os ácidos analisados, em aumentar a concentração de gálio nos resíduos de bauxita após a lixiviação ácida. Dessa forma, os autores utilizaram como adsorbato o lixiviado resultante da lixiviação ácida dos resíduos de bauxita com ácido oxálico, nos estudos de adsorção desta substância por parte da zeólita HY.

Nas condições ótimas para a extração de gálio dos resíduos de bauxita, projetadas por Ujaczki *et al.* (2019) através da metodologia de Design de Experimentos (DOE), a eficiência adsorptiva da zeólita HY em extrair o gálio de uma solução de gálio pura foi de 99,4%. No entanto, a eficiência da zeólita HY para extrair o gálio do lixiviado resultante da lixiviação ácida de RB com ácido oxálico foi de 16,1%. Além disso, a solução resultante da adsorção ainda continha frações de outros elementos provenientes dos resíduos de bauxita.

No entanto, vale lembrar que como Ujaczki *et al.* (2019) informaram que os resultados obtidos em laboratório validaram a predição das condições ótimas para a extração de Ga da LV, preditas por um modelo matemático elaborado através de DOE, a eficiência da zeólita HY em extrair o gálio dos RB pode ser considerada uma eficiência aceitável, uma vez que o gálio é um elemento que está presente em frações muito pequenas nos resíduos de bauxita, com alguns autores classificam as frações de gálio nos RB até mesmo como frações traço. Dessa forma, é importante avaliar se a zeólita HY é mesmo a zeólita mais apropriada para a extração de gálio a partir de resíduos de bauxita, comparando as eficiências de extração de Ga do lixiviado resultante da lixiviação ácida da LV com ácido oxálico, por parte da zeólita HY, com as eficiências de outras zeólitas para a adsorção de gálio do lixiviado mencionado.

Qiang *et al.* (2019) realizaram um trabalho no qual fizeram uma síntese hidrotermal de zeólita X a partir de resíduos de bauxita, nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Os resultados dos testes de adsorção de CO₂ por parte da zeólita sintetizada por Qiang *et al.* (2019) indicam que à temperatura ambiente, nas CNTP, a zeólita X sintetizada a partir de lama vermelha obteve um excelente desempenho para a adsorção de CO₂, o que indica que esta zeólita sintetizada a partir de RB pode ser utilizada para a remoção de CO₂ no âmbito do tratamento de gases industriais.

Belviso *et al.* (2020) realizaram estudos de síntese de zeólita LTA a partir de resíduos de bauxita neutralizados por uma forma nova de neutralização de RB investigada por esses

autores. No estudo conduzido por Belviso *et al.* (2020), os RB utilizados como matéria-prima para a síntese da zeólita LTA foram neutralizados de forma bem-sucedida através de neutralização ultrassônica, com a LV resultante apresentando uma estrutura caracterizada pela presença de hidróxidos duplos em camadas (HDC).

Esta microestrutura da LV neutralizada por ultrassom nos estudos conduzidos por Belviso *et al.* (2020) é similar à da brucita e por conta desta, os HDC possuem propriedades que permitem seu uso em diversas aplicações, incluindo a adsorção, o que permitiu com que houvesse uma base teórica para a síntese de zeólitas LTA a partir de RB neutralizados por meio de neutralização ultrassônica.

Dessa forma, Belviso *et al.* (2020) denominaram as zeólitas LTA sintetizadas a partir de LV neutralizada por meio de neutralização ultrassônica de zeólitas LTA-HDC por conta da microestrutura caracterizada por hidróxidos duplos em camadas dos RB resultantes da neutralização por ultrassom.

Além disso, Belviso *et al.* (2020) conseguiram determinar que as zeólitas LTA-HDC sintetizadas pelos mesmos, em laboratório, possuem uma superfície específica superior às das zeólitas LTA convencionais, com os resultados dos testes de eficiência adsorptiva RO16, conduzidos pelos autores, indicando que as zeólitas LTA-HDC são materiais adsorventes altamente eficientes e que podem ter como principais aplicações o uso como adsorvente para a remoção de matéria orgânica poluente de águas e solos.

Em seguida, Cheng *et al.* (2021) realizaram um estudo no qual sintetizaram uma zeólita híbrida, de características magnéticas a partir da lama vermelha. A primeira etapa da síntese dessa zeólita híbrida foi a síntese da zeólita NaP1 a partir da lama vermelha, com o composto $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ sendo utilizado como matriz magnética da zeólita híbrida resultante.

A zeólita híbrida sintetizada por Cheng *et al.* (2021) foi denominada, dessa forma de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}@\text{NaP1}$, que significa $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ em NaP1, descrevendo assim, a matriz magnética presente no interior da microestrutura da zeólita. O novo material sintetizado por Cheng *et al.* (2021) foi testado como adsorvente para adsorção de azul de metileno presente em uma amostra de água contaminada por esse corante. Com base nos resultados dos experimentos de adsorção realizados com a zeólita híbrida sintetizada, Cheng *et al.* (2021) sugerem que o novo material pode ser utilizado como adsorvente para o tratamento de água residuais, além de ser um material de uso flexível e que pode ser reutilizado, uma vez que é possível realizar a separação magnética da zeólita híbrida da solução resultante do processo de adsorção.

Dessa forma, é correto afirmar que as zeólitas têm sido uma aplicação promissora para a lama vermelha não só para fins de uso como adsorventes para remediação ambiental, como também, para a criação de materiais compósitos que potencializam esse uso das zeólitas sintetizadas a partir da lama vermelha, uma vez que os estudos recentes realizados por Belviso *et al.* (2020) e Cheng *et al.* (2021) comprovam que as zeólitas sintetizadas pelos autores supracitados possuem propriedades como superfície específica superior às das zeólitas LTA comuns, além de uma matriz microestrutural magnética, o que ajuda a potencializar e a flexibilizar ainda mais os uso como adsorventes das zeólitas sintetizadas a partir de resíduos de bauxita.

9.1.3 Resíduos de bauxita como sorventes

O uso dos resíduos de bauxita como sorventes tem sido investigado desde a década de 1950, com Hsu e Maa (1956) tendo publicado o primeiro artigo que trata do uso da lama vermelha como adsorvente. Em seu trabalho, Hsu e Maa (1956) investigaram o uso da lama vermelha proveniente de Taiwan como agente dessulfurante de gases industriais ricos em sulfeto de hidrogênio.

Por conta de já ser sabido naquela época que o óxido de ferro era um adsorvente bastante ativo para a remoção de H_2S de soluções gasosas e da lama vermelha de Taiwan ser rica em Fe_2O_3 , apresentando um teor de 35,5% desse óxido, Hsu e Maa (1956) decidiram investigar as capacidades adsorptivas desse resíduo industrial para a adsorção de sulfeto de hidrogênio.

Em seu trabalho, Hsu e Maa (1956) concluíram que a lama vermelha possui uma alta eficiência de adsorção do sulfeto de hidrogênio, com 0,43 g de H_2S sendo removidos da solução gasosa testada, por 1 g de adsorvente, podendo dessa forma, a LV ser recomendada para o tratamento de gases industriais, visando a remoção do H_2S e, até mesmo, de outros gases sulfurados, dos gases que saem pelas chaminés industriais.

Seguindo a mesma linha de trabalho de Hsu e Maa (1956), Myers e Field (1971) publicaram uma patente, na qual descrevem sua invenção como um novo método de remoção de óxidos de enxofre de gases, que se vale de operações de adsorção para cumprir o seu propósito.

Na patente deste método para a remoção de óxido de enxofre proveniente de gases industriais, Myers e Field (1971) explicitam que um grupo de adsorventes pode ser utilizado para as operações de adsorção que visam a remoção de SO_x dos gases industriais poluentes a serem tratados, sendo que a lama vermelha resultante do refino da bauxita está listada entre os materiais porosos que podem ser usados como adsorvente para o tratamento de gases industriais contaminados por óxidos de enxofre.

Em sua patente, Myers e Field (1971) explicitam que a lama vermelha possui uma boa eficiência adsorvativa para a remoção de óxidos de enxofre de gases industriais, possuindo este resíduo industrial uma eficiência adsorvativa de 29,8% (29,8 g de SO_2 removidos por adsorção a cada 100 g de adsorvente utilizados) à temperatura de 550°C.

A primeira pesquisa que envolveu os estudos do uso da lama vermelha como adsorvente, cujo adsorvato não era uma solução gasosa contaminada por óxidos de enxofre, foi feita por Shannon e Verghese (1976). Nessa pesquisa, os autores investigaram o uso de sólido de lama vermelha alumizada (SLVA) como adsorvente de íons fosfato presentes em amostras de água contaminada por esses íons.

Os íons fosfato são íons muito presentes em fertilizantes (especialmente nos do tipo NPK), que quando presentes em grandes concentrações em corpos d'água, promovem um crescimento desenfreado de algas, ocasionando assim, um fenômeno característico da poluição da água por matéria orgânica, conhecido como eutrofização natural.

Segundo Shannon e Verghese (1976), o SLVA consiste no material resultante da secagem do material resultante do empastamento da lama vermelha com ácido sulfúrico, que é moído até atingir a forma de pó, tendo este material características físicas similares às da cal em pó comercial.

Os resultados dos estudos conduzidos por Shannon e Verghese (1976) indicaram uma remoção de 85% a 94% da quantidade total de íons fosfato presentes nas amostras de água analisadas, resultando em uma queda de 84% da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) das águas analisadas, atestando assim, a alta eficiência adsorvativa do SLVA desenvolvido, o que torna dessa forma, o material viável para o uso no tratamento de águas residuais de atividades agrícolas e industriais, com o objetivo de promover uma redução da contaminação de corpos d'água por íons fosfato, ajudando assim, a impedir a ocorrência de eutrofização natural.

Seguindo a mesma linha do estudo de Shannon e Verghese (1976), Shiao e Akashi (1977) investigaram o uso de LV ativada pela remoção de compostos sódicos, feita através de tratamento com ácido clorídrico, com adsorvente para a remoção de íons fosfato (PO_4^{3-}) de soluções aquosas contaminadas com esses íons.

Em seu trabalho, Shiao e Akashi (1977) demonstraram que a lama vermelha ativada por tratamento ácido é um adsorvente muito eficiente em remover íons fosfato das amostras de água contaminada analisadas, sendo dessa forma, um adsorvente bastante ativo durante a operação de adsorção, permitindo assim, que tenha uma boa aplicação para o tratamento de água residuais contaminadas por íons fosfato, com o objetivo de evitar a eutrofização de corpos d'água.

Durante os primeiros anos da década de 1980, foram feitos os primeiros estudos de investigação das propriedades de adsorção da lama vermelha com o objetivo de utilizar este resíduo industrial como adsorvente para fins de remediação do solo. O primeiro estudo relativo à utilização dos resíduos provenientes do refino da bauxita como agente remediador do solo foi o estudo conduzido por Barrow (1982), no qual o autor investiga as propriedades adsorptivas dos RB referentes à remoção de íons fosfato e metais pesados das amostras de solo estudadas, de modo a melhorar as propriedades físicas e químicas dos solos analisados.

Em seu estudo, Barrow (1982) concluiu que a adsorção de cátions por parte da lama vermelha aumentou com o aumento do pH, com a adsorção de ânions diminuindo à medida que o pH aumenta, o que foi comprovado pelo fato de que as taxas de adsorção de cádmio por parte da lama vermelha aumentaram à medida que o pH aumentou, porém com as taxas de adsorção de fosfato diminuindo com o aumento do pH.

Barrow (1982) determinou que o pH ótimo para uma adsorção eficiente, tanto de metais pesados, quanto de íons fosfato, é um pH um pouco acima de 8, sendo possível o alcance desse pH através de exposição da lama vermelha a ar, seguida de uma mistura desse material com gesso.

Além disso, no final da década de 1980, dois estudos foram realizados com o intuito de investigar o uso da lama vermelha como adsorvente para a adsorção de 1-butanotiol de combustíveis. Singh *et al.* (1988), ao investigar as propriedades de adsorção da lama vermelha, visando o seu uso para a remoção de 1-butanotiol de óleo diesel, determinaram que baixas concentrações de adsorvato no óleo diesel e altas temperaturas favorecem a remoção de 1-

butanotiol do diesel por meio de adsorção, tendo a lama vermelha como adsorvente, com os dados de equilíbrio do sistema seguindo os padrões da isoterma de Langmuir.

Singh *et al.* (1988), ao investigar as propriedades de adsorção da lama vermelha, visando o seu uso para a remoção de 1-butanotiol do querosene, baixas concentrações de adsorvato no querosene e altas temperaturas também favorecem a remoção de 1-butanotiol do querosene por meio de adsorção, tendo a lama vermelha como adsorvente, com os dados de equilíbrio do sistema também seguindo os padrões da isoterma de Langmuir.

Durante a década de 1990, foram realizados os primeiros estudos do uso da lama vermelha para adsorção de corantes e metais pesados presentes em águas e solos contaminados. Namasivayam e Arasi (1997), ao investigarem as capacidades de adsorção da lama vermelha para a remoção de corante vermelho congo de água residuais, constataram que a lama vermelha possui uma capacidade de adsorver 4,05 mg de corante por cada grama de adsorvente utilizado, com o pH ótimo de adsorção sendo o pH.

Segundo Namasivayam e Arasi (1997), os resultados de seus estudos indicam que a lama vermelha é um adsorvente que possui uma boa eficiência em remover o corante vermelho congo de águas residuais, podendo assim, ser indicado para a realização de operações de adsorção deste corante no âmbito do tratamento de águas residuais contaminadas pelo mesmo.

Além disso, Namasivayam e Arasi (1997) também constataram que o mecanismo de adsorção do corante vermelho congo pela lama vermelha possui propriedades que indicam que este pode ser considerado como uma troca iônica, com as isotermas de adsorção obedecendo aos parâmetros das isotermas de Langmuir e Freundlich.

Apak *et al.* (1998), ao realizarem a modelagem da adsorção de cobre (II), cádmio (II) e chumbo (II) por parte da lama vermelha, constataram que as isotermas de adsorção destes metais pesados por parte da LV seguiram bem os parâmetros do modelo da isoterma de Langmuir, com as isotermas de adsorção destes metais pesados pelos RB seguindo melhor o modelo de sítio duplo da isoterma de Langmuir, com o pH ótimo de adsorção estando em 5,5.

Arias *et al.* (1999) investigaram a adsorção de azul de metileno por lama vermelha e constataram que a taxa de adsorção máxima é de 23 mmol de adsorvato por kg de adsorvente utilizado e se dá quando a concentração de azul de metileno na solução a ser adsorvida está em 250 mmol por kg, com o tempo de contato ótimo com o adsorvente sendo de 192h.

Dessa forma, isso significa que a lama vermelha é um adsorvente eficiente em remover o corante azul de metileno de águas contaminadas, uma vez que Arias *et al.* (1999) relatam que, nas condições ótimas de adsorção, a solução mudou da cor para uma coloração transparente.

Pradhan *et al.* (1999), após investigarem a adsorção de cromo hexavalente ou cromo (VI) por lama vermelha, concluíram que a lama vermelha adsorve o cromo (VI) de forma eficiente da solução deste metal, com as isothermas de adsorção obedecendo às isothermas de Langmuir e Freundlich, e adsorção deste metal por parte dos resíduos de bauxita se dando em condições ótimas a uma temperatura de 303 K (30°C), a um pH de 5,2, a uma concentração de adsorvato entre os 2 e 30 mg.L⁻¹, e a uma proporção de adsorvente para solução a ser adsorvida igual a 1:500.

Güçlü e Apak (2000) modelaram com sucesso a adsorção de metais pesados como cobre (II), cádmio (II) e chumbo (II) por parte da lama vermelha, conseguindo determinar que a adsorção destes metais, tanto em sua forma pura, quanto de misturas metal-EDTA, é caracterizada como um fenômeno de quimissorção, com a adsorção destes metais pesados por parte dos resíduos de bauxita podendo ser dar por forças iônicas ou covalentes.

Altundoğan *et al.* (2002) realizaram um estudo acerca da adsorção de íons arsênio de suas soluções aquosas por parte da lama vermelha ativada e constataram que a ativação da lama vermelha por tratamento ácido ajuda a aumentar a capacidade adsorptiva deste material, com Altundoğan *et al.* (2002) demonstrando que uma dosagem de lama vermelha na faixa de 20 a 100 g.l⁻¹ pode ser utilizada para remover de forma efetiva os íons arsênio de suas soluções aquosas.

Altundoğan *et al.* (2002) demonstraram que as eficiências máximas de adsorção de íons arsênio por parte da lama vermelha foram de 96,52% para a remoção dos íons As(V), e de 87,54% para a adsorção dos íons As(III) por parte dos RB, o que torna correto inferir que a lama vermelha ativada por tratamento ácido é um excelente adsorvente para a remoção de íons arsênio de soluções aquosas.

Além disso, Altundoğan *et al.* (2002) destacam que as condições ótimas para a promoção da máxima adsorção de íons arsênio por parte da lama vermelha são um pH entre 5,8 e 7,5 para a adsorção de íons As(III) por parte da LV e um pH na faixa de 1,8 a 3,5 para a adsorção de íons As(V) por parte dos RB, além de uma concentração inicial de arsênio igual a 133,5 µmol.L⁻¹ na solução a ser adsorvida pela LV, uma dosagem de 20 g.L⁻¹ de RB, e um tempo de contato igual a 60 min, com Altundoğan *et al.* (2002) também ressaltando que as

isotermas de adsorção de íons arsênio por parte da lama vermelha seguem bem os parâmetros da isoterma de Langmuir.

Genç *et al.* (2003) investigaram a adsorção de arseniato presente em águas contaminadas por esse íon, por parte de resíduos de bauxita provenientes de Gladstone, na Austrália, neutralizados por água do mar. Esses resíduos possuem o nome comercial de Bauxsol (GENÇ *et al.*, 2003).

Em seu estudo, Genç *et al.* (2003) constataram que o Bauxsol é altamente eficiente em remover os íons arseniato das amostras de água contaminada analisadas, com os parâmetros das isotermas de adsorção seguindo os parâmetros da isoterma de Langmuir, o que atesta a eficiência e viabilidade do uso do Bauxsol para o tratamento de água residuais contaminadas por íons arseniato.

Genç-Fuhrman *et al.* (2004), além de também investigar a adsorção de íons arsenato por Bauxsol, sendo o adsorvente nesse caso, Bauxsol ativado, também investigaram a adsorção de arsenito por parte do mesmo adsorvente que consiste de lama vermelha neutralizada por água do mar. Em seu trabalho, Genç-Fuhrman *et al.* (2004), constataram que, nas condições ótimas de adsorção, o Bauxsol ativado foi capaz de remover praticamente 100% dos íons arseniato e arsenito presentes nas amostras de água contaminada, independente das concentrações de adsorvente e adsorvato, com o pH ótimo de adsorção de arseniato sendo de 4,5 e o pH ótimo de adsorção de arsenito sendo igual a 8,5.

Além disso, Genç-Fuhrman *et al.* (2004), também constataram que a isoterma de adsorção dos íons arseniato e arsenito por Bauxsol ativado possui parâmetros que fazem essa isoterma se encaixar bem de acordo com os parâmetros da isoterma de Langmuir, e que os dados termodinâmicos das operações de adsorção de arseniato e arsenito sugerem que o processo é de natureza endotérmica.

Ademais, Genç-Fuhrman *et al.* (2004), em outro trabalho, também propuseram formas de aumentar a taxa de adsorção de íons arseniato por Bauxsol não-ativado. Os métodos de melhora da taxa de adsorção de íons arseniato por Bauxsol não-ativado propostos pelos autores foram o tratamento ácido do resíduo neutralizado, combinado com tratamento térmico, além da adição de sulfato férrico hidratado $[\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}]$ ou sulfato de alumínio hidratado $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$.

Os resultados dos estudos conduzidos por Genç-Fuhrman *et al.* (2004) indicam que o somente tratamento ácido ou este tratamento combinado com tratamento térmico foram suficientes para promover a mais alta taxa de adsorção observada de íons arseniato por Bauxsol não-ativado, com a adição de sulfato férrico ou sulfato de alumínio hidratados suprimindo a taxa de adsorção.

Li *et al.* (2006) também estudaram os efeitos dos tratamentos ácido e térmico para fins de ativação da lama vermelha, a fim de comparar a capacidade de adsorção dos RB ativados por meio destes tratamentos com a capacidade adsorvativa da lama vermelha pura, no âmbito da adsorção de íons fosfato presentes em soluções aquosas destes íons.

Em seu estudo, Li *et al.* (2006) constataram que os resíduos de bauxita ativados possuem capacidade e eficiência maiores de adsorção de íons fosfato do que a lama vermelha não-ativada, com a LV ativada por tratamentos ácido e térmico removendo 99% dos íons fosfato através de adsorção.

Segundo Li *et al.* (2006), as condições máximas de adsorção de íons fosfato por resíduos de bauxita, tanto ativados, quanto não-ativados, se dão a um pH igual a 7,0 e sob uma temperatura de 25°C. Além disso, Li *et al.* (2006) também constataram que o modelo que melhor descreve as isotermas de sorção dos sistemas de adsorção analisados é o modelo de Langmuir.

Zhu *et al.* (2007) desenvolveram um novo método de preparo de lama vermelha granular (LVG) com o objetivo de avaliar seu uso como adsorvente para a remoção de íons cádmio de soluções aquosas. Os resultados obtidos por Zhu *et al.* (2007) indicam que a LVG possui uma alta capacidade de adsorver íons cádmio de soluções aquosas, com a adsorção de cádmio por LVG sendo um processo espontâneo e termodinamicamente viável.

Além disso, os resultados obtidos por Zhu *et al.* (2007) também indicam que a adsorção de íons cádmio por LVG possui como condições ótimas um pH igual a 6,0, concentração de adsorvato (íons cádmio) na faixa de 50 a 200 mg.L⁻¹, temperatura na faixa 20-40°C, além de ter uma isoterma que segue os parâmetros da isoterma de Freundlich.

Çoruh *et al.* (2011), ao investigarem os efeitos dos tratamentos ácido e térmico nas capacidades adsorvativas da lama vermelha, constataram que a lama vermelha ativada por meio de tratamento ácido possui maiores eficiências de adsorção para a remoção de corante azul de

metileno de amostras de água contaminada, quando comparada com a lama vermelha não-ativada.

Além disso, Çoruh *et al.* (2011) constataram que o tratamento térmico não interfere de forma alguma nas capacidades de adsorção da lama vermelha, seja esta ativada por meio de tratamento ácido, ou não, com a isoterma de sorção do sistema seguindo a do modelo de Dubinin-Radushkevich. Ademais, os resultados obtidos por Çoruh *et al.* (2011) também indicam que a lama vermelha foi bastante eficaz em remover o azul de metileno das soluções aquosas analisadas, com a lama vermelha ativada apresentando as maiores taxas e eficiências de adsorção.

Çoruh *et al.* (2011) também destacam que seus resultados mostram que a adsorção do azul de metileno por parte da lama vermelha é dependente do tempo de contato do adsorvente com a solução a ser adsorvida, do pH, da temperatura, da quantidade de adsorvente adicionada inicialmente, e da concentração de adsorvato, com as taxas de adsorção aumentando à medida que se aumenta a quantidade de adsorvente adicionada inicialmente, o pH da solução de adsorvato, e o tempo de contato do adsorvente com o adsorvato, além de diminuir à medida que se aumenta a concentração de azul de metileno na solução a ser adsorvida.

Geyikçi *et al.* (2012) realizaram a modelagem da adsorção de chumbo proveniente de lixiviado de lodo industrial por lama vermelha, utilizando a metodologia de resposta de superfície (MRS) e redes neurais artificiais (RNA), com os resultados obtidos por Geyikçi *et al.* (2012) indicando que as redes neurais artificiais são mais precisas na realização da modelagem da adsorção de chumbo por parte da lama vermelha.

Redes neurais artificiais são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através do aprendizado de máquina (CARVALHO, 2009). Segundo Carvalho (2009), o aprendizado de máquina necessário para o desenvolvimento e amadurecimento de uma RNA pode dar-se através de reconhecimento de padrões, podendo uma rede neural artificial ter centenas ou milhares de unidades de processamento.

Apresentado o conceito de rede neural artificial, é correto afirmar que, por suas características principais, as RNA foram determinantes para o sucesso de Geyikçi *et al.* (2012) em realizar uma modelagem altamente precisa da adsorção de chumbo proveniente de lixiviado de lodo industrial por parte de lama vermelha, uma vez que por envolverem modelos matemáticos que são aperfeiçoados através de aprendizado de máquina, as redes neurais

artificiais permitem com que seja feita de forma altamente precisa não só a modelagem de sistemas de adsorção, como também, simulações do comportamento desses mesmos sistemas a nível de escala piloto, e até mesmo, industrial.

Venancio (2013) realizou um trabalho no qual construiu e operou uma unidade de transferência de massa gás-líquido em escala piloto, com o objetivo de testar a redução da reatividade dos resíduos de bauxita através de reação com gás de combustão, tendo como ganho adicional a redução nas emissões de dióxido de carbono (CO_2) e dióxido de enxofre (SO_2).

Os resultados obtidos por Venancio (2013) indicaram que o meio de absorção é a principal variável do processo, com a reação dos resíduos de bauxita com os gases de combustão sendo uma reação viável, o que foi atestado pelo fato de o pH de estabilização ter atingido um valor de 10,5, sendo este um valor de pH que é condizente com os dados existentes na literatura para o pH dos resíduos de bauxita quando estes estão em equilíbrio químico com o ambiente rico em CO_2 .

Além disso, os resultados obtidos por Venancio (2013) indicam que uma suspensão de lama vermelha pode ser utilizada para a remoção de SO_2 de correntes de gases industriais, em substituição a outras soluções alcalinas, com a absorção de SO_2 por parte dos RB se dando de maneira simultânea à sua carbonatação, o que pode permitir o uso de combustíveis com maiores teores de enxofre e de menor custo, com as maiores emissões de CO_2 e SO_2 sendo compensadas pela presença da lama vermelha presente como absorvente desses gases em pratos localizados ao longo das chaminés industriais.

Shin *et al.* (2014) estudaram as capacidades de adsorção de metais pesados, como arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel e zinco, por parte de quatro diferentes adsorventes, sendo estes lama vermelha, zeólita natural, calcário e casca de ostra, dentre os quais, a lama vermelha foi o que teve o melhor desempenho na remoção destes metais pesados de suas respectivas soluções aquosas, por meio de adsorção.

Wang *et al.* (2016) realizaram um estudo no qual avaliaram as taxas e eficiência de adsorção de íons fosfato por parte de cinco diferentes adsorventes, sendo três destes resíduos industriais, e os outros dois, adsorventes naturais. Os resíduos industriais analisados foram a lama vermelha, cinzas volantes e alúmen férrico, com os adsorventes naturais sendo uma zeólita natural e terra diatomácea.

Os resultados obtidos por Wang *et al.* (2016) indicam que a lama vermelha foi o adsorvente mais eficiente na remoção de íons fosfato de águas contaminadas, por meio de adsorção, com o modelo das isotermas de sorção dos sistemas de adsorção analisados seguindo o modelo de Langmuir, e o pH ótimo para a promoção da máxima adsorção sendo o pH 7.

Kazak e Tor (2020) realizaram a síntese de cinzas magnéticas (hidrochar magnético) através do tratamento co-hidrotermal, baseado em carbonização hidrotérmica (CTH), de vinhaça, com lama vermelha, a fim de se avaliar as propriedades dessas cinzas na adsorção de íons chumbo.

Os resultados obtidos por Kazak e Tor (2020) indicam que a síntese das cinzas magnéticas foi feita com sucesso, uma vez que simultaneamente à CTH da vinhaça através do uso de lama vermelha, ocorreu a redução do Fe_2O_3 presente na lama vermelha para Fe_3O_4 . Além disso, os resultados de Kazak e Tor indicam que as cinzas magnéticas sintetizadas foram altamente eficientes em remover o chumbo das amostras de água contaminadas analisadas, com as isotermas de adsorção melhor seguindo o modelo de Freundlich. Ademais, Kazak e Tor (2020) também apontam que as condições ótimas de adsorção se dão em um pH acima de 5.

Kazak *et al.* (2020), ao realizarem a pirólise de bolas de polissulfona dopadas com lama vermelha, conseguiram sintetizar com sucesso carbono poroso magnético (CPM), e assim, avaliar as capacidades de sorção de diferentes óleos e combustíveis por parte do CPM sintetizado, sendo os óleos e combustíveis analisados, azeite de oliva, óleo mineral, óleo diesel e gasolina.

Os resultados obtidos por Kazak *et al.* (2020) indicam que o carbono poroso magnético teve suas propriedades magnéticas advindas do Fe_2O_3 presente na lama vermelha e que o CPM foi altamente eficiente em sorver os óleos analisados de suas respectivas amostras, o que se deu por conta da natureza hidrofóbica do carbono poroso magnético, o que faz com que o material sintetizado tenha uma alta afinidade com os óleos sorvidos.

Barca *et al.* (2021) realizaram um importante estudo no qual analisaram a adsorção de íons fosfato por parte de lama vermelha carbonatada sob condições aeróbicas e anóxicas. Os resultados obtidos por Barca *et al.* (2021) indicam que a lama vermelha carbonatada possui uma boa capacidade de adsorção de íons fosfato de suas soluções aquosas, com as capacidades de adsorção de íons fosfato pela lama vermelha carbonatada sendo de 0,63 mg de fosfato por g de lama vermelha carbonatada, em condições aeróbicas, e de 0,61 mg de fosfato por g de lama vermelha carbonato, em condições anóxicas.

Além disso, os resultados obtidos por Barca *et al.* (2021) indicam que a lama vermelha carbonatada possui um excelente desempenho na adsorção de íons fosfato de suas soluções aquosas, sendo as eficiências de adsorção de íons fosfato por parte da lama vermelha em condições aeróbicas e anóxicas iguais a, respectivamente, 98,5% e 91,6%.

Dessa forma, os resultados obtidos por Barca *et al.* (2021) indicam que as melhores condições para a remoção de íons fosfato de suas soluções aquosas por meio de adsorção, tendo lama vermelha carbonatada como adsorvente, foram as condições aeróbicas. Porém, os resultados obtidos pelos autores supracitados indicam que, até mesmo em condições anóxicas, a LV carbonatada possui um excelente desempenho na remoção de íons fosfato de suas soluções aquosas por meio de adsorção, o que atesta que os resíduos de bauxita carbonatados podem ser muito bem utilizados como agentes de remoção de íons fosfato, no tratamento de água residuárias.

Wu *et al.* (2021), ao realizarem a calcinação de RB com ferro e carbono, a 600°C, conseguiram sintetizar lama vermelha combinada com ferro e carbono por calcinação a 600°C (LVCFCC@600). Com isso, Wu *et al.* (2021) avaliaram as capacidades adsorptivas dessa lama vermelha para a remoção de íons urânio presentes em águas contaminadas por esse elemento radioativo.

Os resultados obtidos por Wu *et al.* (2021) indicam que a LVCFCC@600 possui uma alta capacidade de adsorção de urânio, sendo esta de 59,45 mg de urânio por grama de adsorvente adicionado ao sistema, além de possuir uma eficiência igual a 82,2% para a remoção de urânio das amostras de água analisadas por meio de adsorção.

Dessa forma, em face de todos os estudos apresentados nesta seção, é correto afirmar que a busca por aplicações da lama vermelha como sorvente químico vem sendo feita desde há quase 70 anos, e que os vários estudos mostrados comprovam que a lama vermelha pode ser sim empregada como um excelente adsorvente para a remoção de íons fosfato presentes em águas contaminadas por fertilizantes, além de ser aplicada como adsorvente para fins de remediação de água residuárias e solos contaminados por metais pesados.

Além disso, é correto afirmar que a lama vermelha também pode ser utilizada, até mesmo, para o tratamento de água radioativas, especialmente, as provenientes de piscinas de usinas nucleares, uma vez que a lama vermelha, ao ser calcinada a 600°C na presença de ferro e carbono, conforme descrito por Wu *et al.* (2021), produz uma lama vermelha especial que

possui boas propriedades de adsorção de íons urânio presentes em amostras de água contaminada analisadas pelos autores supracitados.

9.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

9.2.1 Considerações gerais

Cada vez mais, em nossa atual era tecnológica, é necessário buscar novos materiais que sejam mais eficientes e tenham características que as ligas metálicas não possuem (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Para isso, se torna necessário o desenvolvimento de novos materiais que possam substituir, mesmo que parcialmente, as ligas metálicas e, nesse quesito, entra a utilização dos materiais compósitos (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2020).

Smith e Hashemi (2012) comentam que não há um consenso entre a academia acerca da definição de materiais compósitos, com os autores definindo os compósitos como materiais formados por uma mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes que diferem na forma e na composição química e que, na sua essência, são insolúveis um no outro.

Marinucci (2011), por sua vez, define os materiais compósitos como materiais formados por dois ou mais componentes quimicamente diferentes, os quais em escala macroscópica, possuem uma interface bem definida que os separa visualmente, ao passo que Callister Jr. e Rethwisch (2020) definem os materiais compósitos como qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constitui, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades.

Dessa forma, de acordo com Medeiros (2006), os materiais compósitos tornam-se materiais com propriedades superiores, ou melhores, em alguns aspectos, às propriedades de seus constituintes. Medeiros (2006) apresenta da seguinte forma a sua definição de materiais compósitos.

São materiais feitos artificialmente e constituídos por materiais quimicamente diferentes e separados por uma interface distinta. Os compósitos mais simples são formados por duas fases: uma chamada de matriz, que é contínua e envolve a outra fase que é normalmente chamada de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são, portanto, funções das propriedades de suas fases constituintes, das suas quantidades relativas, e da geometria da fase dispersa, entendendo-se por geometria

da fase dispersa, o formato, o tamanho, a distribuição e orientação de suas partículas. (MEDEIROS, 2006)

De acordo com Callister Jr. e Rethwisch (2020), há uma grande variedade de materiais compósitos, dentre os quais, pode-se destacar os de matriz cerâmica e polimérica, com Callister Jr. e Retwisch (2020) propondo o seguinte esquema para a classificação dos vários tipos de materiais compósitos existentes, sendo este esquema apresentado a seguir, na Figura 24.

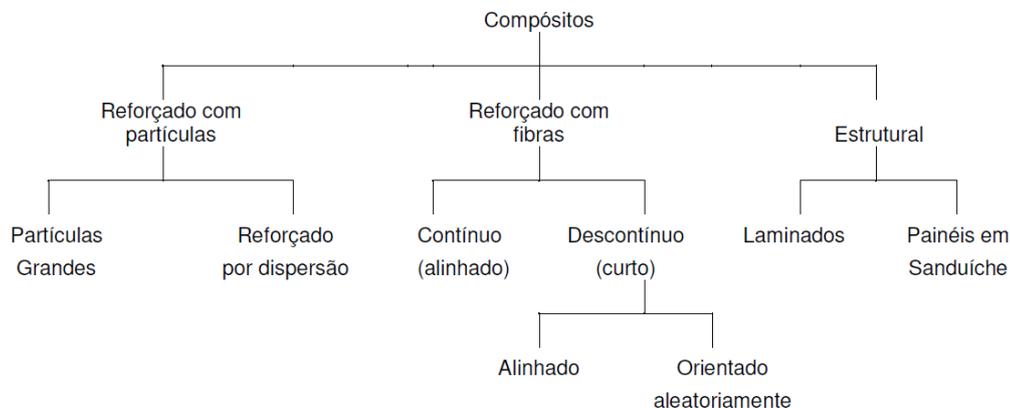


Figura 24 – Esquema de classificação de materiais compósitos. Fonte: CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2020.

9.2.2 Revisão dos estudos conduzidos ao redor do mundo

Conforme visto na seção anterior, os resíduos provenientes do refino de bauxita podem ser utilizados para a síntese de materiais compósitos com propriedades de adsorção similares ou até mesmo superiores às da lama vermelha ativada. Porém, o uso da lama vermelha para a síntese de materiais compósitos visa, não somente, a criação de novos materiais com propriedades adsorptivas superiores, como também, a criação de compósitos com propriedades mecânicas superiores às dos resíduos, visando principalmente, a aplicação destes materiais para a construção civil.

Desde a década de 1960, são feitas pesquisas com o objetivo de realizar síntese de materiais compósitos a partir dos RB, com a primeira pesquisa sendo feita por Yuan *et al.* (1969), na qual os autores criam um material compósito de matriz polimérica que possui como matérias-primas lama vermelha, uma mistura de poliéster e estireno insaturados, e fibra de sisal.

Em seu trabalho, Yuan *et al.* (1969) constataram que o compósito de matriz polimérica sintetizado possui capacidades de adsorção superiores às da lama vermelha, além de possuir propriedades mecânicas superiores às de suas matérias-primas, especialmente, uma mais alta resistência ao impacto.

Yuan *et al.* (1969) explicitaram que o processo de polimerização deste material compósito é induzido por raios gama provenientes da fissão nuclear do cobalto-60 localizado no irradiador do equipamento polimerizador por radiação, e que o custo total anual de operação é de US\$ 1,2 milhão, resultando assim, em custo de produção igual US\$0,25 por kg de compósito produzido. Esses valores em 2021, atualizados pela inflação, indicam um custo anual de operação do processo de aproximadamente US\$8,927 milhões e um custo de produção de US\$1,86 por kg de produto produzido.

É importante ressaltar que Yuan *et al.* (1969) realizaram essas estimativas de custos de operação do processo, baseados em uma estimativa de produção do compósito a um nível de 10.000 toneladas por ano, em uma planta industrial de pequena escala que opera durante 8000h por ano, considerando que uma dose de radiação igual a 0,8 Mrad seja necessária para a promover a polimerização e a cura das matrizes poliméricas dos compósitos produzidos, de modo a promover a máxima conversão da reação, às taxas de reação mais altas. Além disso, para os cálculos dos custos de operação da planta de produção do compósito, Yuan *et al.* (1969) assumiram que o irradiador possui uma potência de operação igual a 15 kW e que possui uma eficiência de 25% na conversão de energia elétrica em radiação.

Com base na pesquisa realizada por Yuan *et al.* (1969), é correto afirmar que a China sempre esteve na vanguarda da realização de pesquisas voltadas para a síntese de materiais compósitos a partir da lama vermelha, ainda mais por conta do fato de até a década de 1990, todas as pesquisas voltadas para a síntese de materiais compósitos a partir da lama vermelha terem sido feitas por pesquisadores chineses lotados em universidades chinesas.

O que reforça ainda mais os fatos apresentados são os trabalhos de pesquisa conduzido durante a década de 1980 por Yuanjiang e Guiwen (1984) e Mingxiao *et al.* (1989), nos quais os autores sintetizam um compósito feito de policloreto de vinila (PVC) e lama vermelha e avaliam seu uso para a fabricação de tubos, e realizaram estudos da microestrutura desse material compósito.

Além disso, vale destacar o trabalho feito por Zhanxun *et al.* (1990), no qual os autores fabricam tubos a partir do mesmo compósito de PVC e lama vermelha sintetizado por

Yuanjiang e Guiwen (1984) e Mingxiao *et al.* (1989), de modo a investigar mais a fundo essa aplicação prática do compósito estudado, além de complementar as informações das propriedades desse material compósito levantadas nos dois estudos anteriores.

O ano de 1990 foi marcado como o primeiro ano em que houve a realização, fora da China, de pesquisas científicas envolvendo a síntese de materiais compósitos a partir de resíduos de bauxita, sendo o trabalho desenvolvido por Khazanchi e Saxena (1990) o primeiro projeto de pesquisa a ser realizado fora da China, que envolve a síntese de compósitos a partir de LV.

Khazanchi e Saxena (1990) desenvolveram um compósito de matriz polimérica, baseado em fibra de sisal, tendo a lama vermelha como material de enchimento da matriz. O compósito desenvolvido por Khazanchi e Saxena (1990) foi criado com o propósito de ser utilizado na fabricação de telhas residenciais leves, de modo a permitir uma substituição economicamente viável das telhas de amianto.

Na década de 1990, houve a publicação de quatro trabalhos científicos que envolviam em suas respectivas pesquisas a realização da síntese de materiais compósitos a partir de lama vermelha. Singh e Gupta (1995) avaliaram a influência da realização de tratamentos de superfície na lama vermelha, nas propriedades de materiais compósitos à base de lama vermelha e poliéster.

Singh *et al.* (1995) realizaram o tratamento da lama vermelha e de fibras de sisal com diferentes quelatos hidrofóbicos baseados em silício e titânio e, avaliaram a influência do tratamento destes materiais nos materiais compósitos sintetizados à base de resíduos de bauxita e fibra de sisal, além de terem realizado um estudo do comportamento mecânico de laminados feitos do compósito sintetizado, com o objetivo de avaliar sua aplicabilidade como material de construção.

Os resultados obtidos por Singh *et al.* (1995) indicaram que os compósitos à base de lama vermelha e fibra de sisal tratados com quelatos hidrofóbicos baseados em silício e titânio possuem propriedades físicas e mecânicas superiores às de outros compósitos baseados somente em fibra de sisal, podendo assim, os compósitos à base de fibra de sisal e lama vermelha serem utilizados para a fabricação de materiais de construção como painéis e revestimentos.

Em seguida, Gordon *et al.* (1996) investigaram as propriedades mecânicas de materiais compósitos feitos a partir de lama vermelha, cal hidratada e vapor de sílica condensada, com o

objetivo de criar um material compósito feito de lama vermelha que possa ser utilizado como matéria-prima para a fabricação de materiais de construção, com Chand e Hashmi (1998) realizando estudos da influência da adição de policarbonato no desgaste por stress de materiais compósitos feitos de lama vermelha e polipropileno isotático (PPI).

Durante os anos 2000, foi desenvolvido e caracterizado por Prasad (2006) o primeiro material compósito de matriz metálica, feito a partir de lama vermelha, com o autor do estudo, tendo também, realizado a caracterização do compósito criado.

Em seguida, Gök *et al.* (2007) realizaram a síntese de um material compósito à base de lama vermelha e polianilina, fazendo também, análises de determinação de suas propriedades elétricas e estabilidade térmica.

No mesmo ano da publicação do trabalho de Gök *et al.* (2007), Bhat e Bantia (2007) publicaram um trabalho no qual descreveram e comprovaram uma melhora das propriedades microestruturais de um material compósito de matriz polimérica, à base de lama vermelha e hidrocloreto de anilina, através da organofilização dos RB utilizados na síntese do compósito, por álcool polivinílico e formaldeído de anilina. Além disso, no mesmo ano, Bhat e Bantia (2007) também publicaram outro trabalho no qual os autores realizaram a caracterização das principais propriedades do material compósito sintetizado.

Em seguida, Akinci *et al.* (2008) realizaram um estudo das propriedades mecânicas de materiais compósitos à base de polipropileno recheados por lama vermelha e constataram que a adição de 30-40% de lama vermelha à matriz polimérica promove uma síntese de baixo custo desse compósito, além de melhorar a sua dureza e suas propriedades de resistência mecânica, com Satapathy e Patnaik (2008) tendo realizado uma análise do comportamento do desgaste por deslizamento seco de compósitos de matriz de poliéster recheada com lama vermelha.

Biswas e Satapathy (2009) realizaram uma análise da performance tribológica de compósitos à base de vidro e resina epóxi, recheados com lama vermelha, utilizando o método experimental de Taguchi. Além disso, Biswas e Satapathy (2010) também realizaram um estudo comparativo das características de erosão de materiais compósitos à base de bambu e resina epóxi e, vidro e resina epóxi, tendo os dois compósitos sintetizados por Biswas e Satapathy (2010) um enchimento de lama vermelha, com Dash *et al.* (2010) tendo realizado um estudo de análise das propriedades mecânicas de um compósito de matriz polimérica, recheados com lama vermelha, e reforçados com fibras de juta.

Durante a década de 2010, houveram diversos avanços significativos no estudo dos materiais compósitos sintetizados a partir da lama vermelha. He *et al.* (2013) realizaram a síntese e a caracterização de compósitos baseados em lama vermelha e cinzas de casca de arroz, com Traoré *et al.* (2017) tendo realizado a síntese a caracterização de um material compósito do mesmo tipo, porém, também realizando análises de propriedades mecânicas, visando a aplicação do compósito na construção civil, de modo a permitir a aplicação desse material compósito como material de construção de baixo custo.

Além disso, outros avanços em relação a pesquisas de materiais compósitos à base de lama vermelha, feitos durante a década de 2010, merecem destaque nesta seção, sendo estes a síntese, o processamento, a caracterização e o estudo das aplicações de materiais compósitos de lama vermelha e nanotubos de carbono, feitos por Abbasi *et al.* (2016), além da criação de um material compósito de bicarbonato de sódio (NaHCO_3) e lama vermelha, por parte de Wang *et al.* (2017), que exhibe propriedades muito boas de supressão de explosões causadas por metano, além de exibir propriedades superiores de supressão de explosões causadas por metano, quando comparado com suas matérias-primas.

Lokesh *et al.* (2018) investigaram os efeitos da adição de partículas de lama vermelha na resistência ao risco de materiais compósitos de matriz metálica de alumínio, com os resultados obtidos pelos autores indicando que o teor ótimo de lama vermelha nos compósitos é de 2% p., uma vez que foi com esse teor de lama vermelha em sua estrutura, o compósito apresentou a superioridade máxima de dureza em relação à matriz metálica pura, com a dureza do compósito caindo a partir desse teor de lama vermelha em sua microestrutura, à medida que se aumenta o teor de RB.

Ademais, estudos da síntese de materiais compósitos de lama vermelha e ligas de alumínio, com Krupakara (2013) realizando a síntese de compósitos de matriz metálica, à base de liga de alumínio Al-6061 e lama vermelha e, a caracterização da corrosão desse compósito, e Samal *et al.* (2020) realizando um estudo do comportamento do deslizamento seco da microestrutura do compósito de matriz metálica, à base de liga de alumínio Al-6082, reforçado por lama vermelha e sintetizado pelos autores.

Shi *et al.* (2020) realizaram a síntese de um compósito de nitreto de carbono modificado por lama vermelha a fim de apresentar um material que consiga realizar com sucesso a remoção de poluentes orgânicos de água residuárias por meio de efeitos combinados

de adsorção e fotocatalise, tendo os autores conseguido cumprir com sucesso os objetivos de seu trabalho.

Por fim, recentemente, Taye *et al.* (2021) realizaram a síntese de um material compósito baseado em cinzas volantes e lama vermelha, reforçado com fibra de cânhamo, além de terem realizado uma análise de suas propriedades mecânicas. Os resultados obtidos por Taye *et al.* (2021) indicam que o teor de fibra reforçadora é de 9% v., o que faz com que nesse teor de fibra de cânhamo, os compósitos apresentem uma resistência à tração igual 5,5 MPa e uma resistência à compressão igual a 40 MPa, o que segundo Taye *et al.* (2021), torna este material compósito um material dúctil e um excelente material alternativo para uso com material de construção, devendo ser feitos estudos de citotoxicidade, durabilidade e lixiviação, de modo a avaliar e atestar a segurança e confiabilidade do compósito para uso como material de construção.

Dessa forma, é correto afirmar que o uso de resíduos de bauxita e seus materiais compósitos para a fabricação de materiais é uma aplicação bastante promissora, uma vez que em seu *roadmap* (roteiro) para a maximização do uso de resíduos de bauxita, o IAI (2020) aponta que os resíduos de bauxita podem ser utilizados para a fabricação de clínquer para cimentos Portland, com essa aplicação para os resíduos de bauxita tendo sido investigada por Ferreira (2019) que, em sua pesquisa, investigou, respectivamente, as resistências mecânicas de blocos de cimento Portland compostos, com escória de alto forno e, pozolânico, ao longo de determinados períodos de cura dos blocos.

9.2.3 Revisão dos estudos conduzidos no Brasil

No Brasil, o primeiro estudo sobre a síntese de materiais compósitos foi um trabalho realizado por Souza *et al.* (2005), no qual os autores realizaram uma avaliação das propriedades mecânicas e térmicas de um material compósito à base de lama vermelha, de matriz polimérica, sintetizado em laboratório pelos mesmos. Segundo Souza *et al.* (2005), o material compósito é constituído de uma matriz de polimetacrilato de metila (PMMA), sendo esta matriz carregada com lama vermelha.

Conforme indicado pelos resultados obtidos por Souza *et al.* (2005), o teor ideal de adição de lama vermelha, na matriz polimérica de PMMA ou acrílico do material compósito sintetizado pelos autores, é de 20% p de RB, uma vez que este teor de LV confere maior dureza

e menor densidade ao material, tornando assim, o material mais leve e mais resistente à deformação plástica, o que torna este compósito um material mais atrativo para a fabricação de placas de acrílico modificado por LV, o que permite com que se tenha uma boa aplicação para o material compósito estudado por Souza *et al.* (2005).

No ano seguinte à apresentação do trabalho realizado por Souza *et al.* (2005), Medeiros (2006) realizou um trabalho no qual foram avaliadas as propriedades mecânicas de materiais compósitos de matriz de PVC reforçada com fibras de sisal e nylon 6, sendo as propriedades mecânicas dos compósitos avaliadas as suas resistências à tração e ao impacto, e suas durezas.

Além disso, outro avanço importante feito no Brasil, em relação ao estudo do uso de resíduos de bauxita para a síntese de materiais compósitos, foi o trabalho conduzido por Oliveira *et al.* (2010), no qual os autores realizaram a síntese de materiais compósitos anfifílicos de propriedades magnéticas, baseados em partículas de Fe e Fe₃O₄, envoltas por nanotubos e nanofibras de carbono, tendo estes materiais como matérias-primas a lama vermelha e o etanol.

Os estudos conduzidos por Oliveira *et al.* (2010) são considerados como a primeira pesquisa no mundo, que envolve a síntese de materiais compósitos baseados em lama vermelha e nanomateriais de carbono, sendo estes nanofibras e nanotubos.

Oliveira *et al.* (2010), ao analisarem as interações dos materiais compósitos sintetizados, com água e várias substâncias hidrofóbicas, como óleo de soja e óleo de decalina, os materiais compósitos formaram emulsões, comprovando assim, as propriedades dos materiais compósitos analisados. Oliveira *et al.* (2010) descreve da seguinte forma como a separação magnética do material compósito sintetizado pelos mesmos auxilia na separação total do biodiesel de uma emulsão água-biodiesel.

Quando os compósitos foram adicionados a uma emulsão água-biodiesel estável, as partículas anfifílicas difundiram-se para a interface água-óleo. As partículas do compósito foram atraídas por ímãs e carregaram com elas as gotas de óleo, levando à completa desemulsificação e à separação do biodiesel da água. (OLIVEIRA *et al.*, 2010)

Seguindo a mesma linha de pesquisa do trabalho anterior, Oliveira *et al.* (2011), também realizaram a síntese de um material compósito de propriedades magnéticas, baseado

em núcleos de ferro envoltos por nanotubos e nanofibras de carbono, tendo estes materiais como matérias-primas a lama vermelha e o etanol.

Oliveira *et al.* (2011), ao analisarem as propriedades adsorptivas destes materiais compósitos, constataram que os materiais compósitos sintetizados pelos mesmos exibiram excelentes propriedades de adsorção para a remoção de corantes azul de metileno e índigo carmim de suas respectivas soluções aquosas.

Além disso, Oliveira *et al.* (2011) também confirmaram que o novo material compósito pode ser utilizado para produzir um catalisador reciclável, a base de paládio, com Oliveira *et al.* (2011) destacando que os testes realizados com o catalisador reciclável produzido, demonstrando que ao final da reação de teste, a hidrogenação do 1,5-ciclooctadieno, o catalisador pode ser facilmente separado do meio reacional através de separação magnética, podendo este ser reutilizado por até cinco vezes.

Além disso, Oliveira *et al.* (2011), ressaltam que o catalisador magnético sintetizado através da colocação do compósito sintetizado em uma base de Pd demonstrou um excelente desempenho catalítico para a reação de hidrogenação do 1,5-ciclooctadieno.

Nunes (2015) realizou estudos nos quais analisou a influência da lama vermelha e da fibra de curauá nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz polimérica, sendo as matrizes destes compósitos constituídas de poliéster isofitálico.

O curauá é uma planta bromeliácea, de nome científico *Ananas lucidus*, pertencente ao mesmo gênero do abacaxi (NUNES, 2015). Segundo Nunes (2015), as principais características da fibra de curauá são resistência mecânica, leveza, ausência de odor e suavidade ao toque. Conforme pode ser visto na Figura 25, o curauá é uma planta que possui aparência e aspectos bastante similares às do abacaxi.

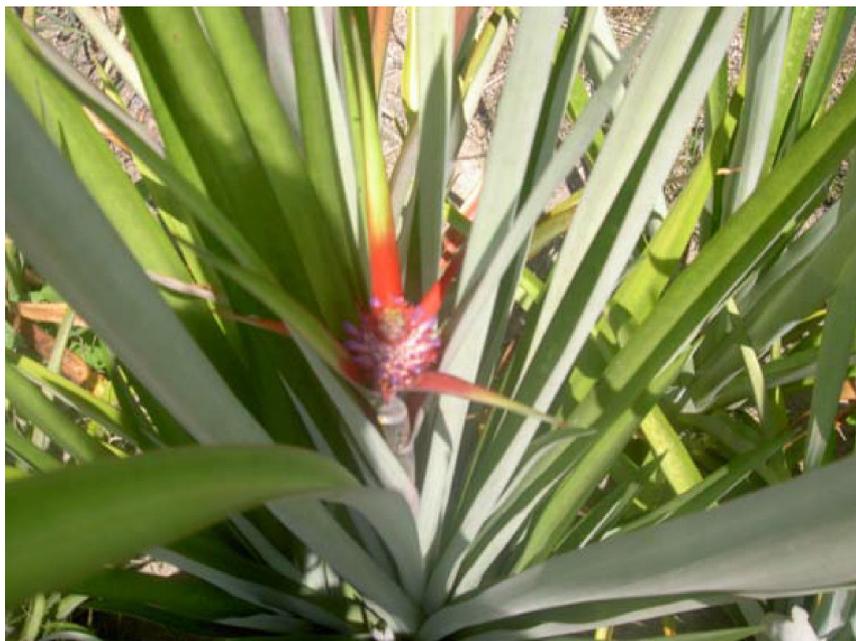


Figura 25 – Planta de curauá. Fonte: NUNES, 2015, p. 11.

Os resultados obtidos por Nunes (2015) indicam que a adição de lama vermelha e fibra de curauá ao poliéster isoftálico reduziu significativamente a tensão de ruptura em testes de tração, com a tensão de ruptura média obtida experimentalmente sendo de 14,24 MPa. Além disso, os resultados obtidos por Nunes (2015) indicam que o melhor resultado de resistência à tração foi de 24,64 MPa, com este resultado tendo sido alcançado nas proporções de 10%(v/v) de LV e 10%(v/v) de fibra de curauá.

Além disso, Nunes (2015) constatou em sua pesquisa que a adição de lama vermelha ao compósito de matriz de poliéster isoftálico contribuiu com o aumento da melhora do módulo de elasticidade, alcançando este parâmetro mecânico do compósito analisado um valor máximo de 0,7269 GPa quando os teores, tanto de lama vermelha, quanto de fibra de curauá foram iguais a 10%(v/v).

Outro grande avanço nas pesquisas brasileiras voltadas para o uso de lama vermelha para a produção de materiais compósitos foi o estudo realizado por Bento *et al.* (2016), no qual os autores realizaram a síntese de um material compósito à base de lama vermelha e politereftalato de etileno (PET) e avaliaram as suas propriedades catalíticas e adsorptivas.

Tendo soluções de azul de metileno como soluções de teste, Bento *et al.* (2016) conseguiram avaliar com sucesso as propriedades catalíticas e adsorptivas do compósito sintetizado, comprovando que o compósito obteve um desempenho excelente para a adsorção

do azul de metileno e a promoção da reação de oxidação do mesmo corante. Conforme indicado pelos resultados obtidos por Bento *et al.* (2016), uma média de 90% do azul de metileno presente nas soluções aquosas testadas foram adsorvidas pelo compósito de LV e PET, e foram oxidados com sucesso.

Dessa forma, os resultados dos estudos conduzidos por Bento *et al.* (2016) atestam a alta eficiência catalítica e adsortiva do compósito de resíduo de bauxita e PET em adsorver e promover a oxidação do azul de metileno, atestando também, que o compósito pode ser utilizado como agente remediador no tratamento de água residuárias.

Seguindo a mesma linha de pesquisa do trabalho de Bento *et al.* (2016), Sousa (2017) realizou a síntese de materiais compósitos de LV e PET, com o objetivo de avaliar as propriedades catalíticas e adsortivas desse material para a remoção de azul de metileno e paracetamol de suas respectivas soluções aquosas e, na promoção da oxidação catalítica desses adsorvatos.

Os resultados obtidos por Sousa (2017) indicam que o compósito sintetizado apresentou uma excelente eficiência de remoção do azul de metileno de sua solução aquosa por meio de adsorção e promoção catalítica de sua oxidação, com a taxa de remoção de azul de metileno sendo de 97%. Além disso, os resultados dos experimentos conduzidos por Sousa (2017) também indicam que a eficiência de remoção do paracetamol de sua solução aquosa foi de 40%, o que em si pode ser considerado com uma boa taxa de remoção do paracetamol de sua solução aquosa através de adsorção e oxidação.

Sousa (2017) destaca que as condições de remoção máxima do azul de metileno e do paracetamol de suas soluções aquosas foram obtidas com a ativação do compósito sendo feita a 800°C, por 5 horas, com as capacidades de remoção do azul de metileno e do paracetamol de suas respectivas soluções aquosas estando relacionada à área específica e às fases de ferro presentes, com a remoção dos contaminantes analisados de suas respectivas soluções aquosas ocorrendo por meio de um mecanismo combinado de adsorção e oxidação por meio do processo Fenton heterogêneo.

Com base nos resultados obtidos em seus experimentos, Sousa (2017) concluiu que a utilização de resíduos de PET e lama vermelha pode ser uma alternativa promissora do ponto de vista ambiental, uma vez que a criação de materiais compósitos baseados em PET e resíduos de bauxita utiliza resíduos sólidos gerados em grandes quantidades na indústria como

precursores para a produção de catalisadores que podem ser empregados no tratamento de efluentes líquidos.

Outro grande estudo feito no Brasil, envolvendo a síntese de materiais compósitos a partir de resíduos de bauxita foi o estudo conduzido por Barbosa (2019), no qual a autora realizou a síntese e a caracterização de compósitos baseados em resíduos pós-consumo e resíduos industriais, sendo o poliestireno o resíduo pós-consumo empregado para a síntese do compósito analisado por Barbosa (2019) e, a lama vermelha e a fibra de vidro ou resina epóxi os resíduos industriais utilizados para a síntese do mesmo compósito.

Santos *et al.* (2020), ao realizarem uma análise da influência da variação da granulometria da lama vermelha em compósitos de matriz polimérica baseados em LV, constataram que os compósitos apresentaram resultados satisfatórios nos testes de resistência à tração e a chama, com os resultados desses testes para os compósitos analisados sendo melhores que os dos testes realizados para a matriz pura.

Oliveira *et al.* (2020) e Lima *et al.* (2020) realizaram estudos nos quais, respectivamente, fizeram análises de flamabilidade de materiais compósitos à base de matriz polimérica de resina poliéster isoftálica insaturada, lama vermelha e fibras de sisal e juta, e análises da influência da sedimentação gravitacional da lama vermelha na resistência a chama de compósitos de matriz polimérica.

Os resultados obtidos por Oliveira *et al.* (2020) indicam que os compósitos que obtiveram melhor desempenho na redução da velocidade de propagação das chamas foram, respectivamente, o compósito resina-40LV com uma redução de 53% na velocidade de propagação de chamas, o compósito resina-sisal-30LV com uma redução de 34% na velocidade de propagação de chamas e, o compósito poliéster-juta-30LV com uma redução de 28% na velocidade de propagação de chamas.

Por fim, os resultados dos estudos conduzidos por Lima *et al.* (2020) indicam que os compósitos de matriz polimérica com 40% de lama vermelha sedimentada e em suspensão obtiveram os melhores resultados nos testes de resistência a chama, obtendo também, resultados melhores que os das matrizes poliméricas puras para os mesmos testes de resistência a chamas.

9.3 CATÁLISE

9.3.1 Considerações gerais

De acordo com Marques (2019), diversos fatores afetam a velocidade de uma reação química, dentre os quais, podem ser citados a natureza dos reagentes e produtos, a temperatura, a presença de catalisadores ou inibidores da reação, as concentrações das espécies reagentes, a pressão e a presença de luz (no caso de reações fotoquímicas).

Segundo Fogler (2009), um catalisador é uma substância que afeta a velocidade da reação, porém sai inalterado do processo. De acordo com Fogler (2009), um catalisador geralmente muda a velocidade de uma reação por meio de uma diferente rota molecular ou mecanismo para a reação.

Levenspiel (1999) especifica que os catalisadores afetam o mecanismo de uma determinada reação química, de modo a aumentar a sua velocidade, ao passo que os inibidores afetam o mecanismo de uma determinada reação química, de modo a diminuir a sua velocidade, ou até mesmo, anular a sua ocorrência.

Levenspiel (1999), Fogler (2009) e Marques (2019) concordam que o mecanismo de uma reação química é alterado pelo fato de os catalisadores ajudarem a alterar a energia de ativação da reação, de modo a diminuí-la. A energia de ativação é entendida como a barreira energética para a ocorrência da reação, podendo dessa forma, ser definida como a energia mínima necessária que o sistema reacional tenha para que uma determinada reação química ocorra (LEVENSPIEL, 1999; FOGLER, 2009).

Fogler (2009) define a catálise como sendo a ocorrência, estudo e o uso de catalisadores e processos catalíticos, ressaltando também, que os catalisadores alteram apenas o mecanismo de uma reação, sem alterar o equilíbrio químico da reação em questão durante o processo de alteração de seu mecanismo.

A seguir, na Figura 26, é mostrada a forma como um catalisador altera o mecanismo da reação entre os gases hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) para formar vapor d'água (H_2O), de modo a aumentar a velocidade da reação.

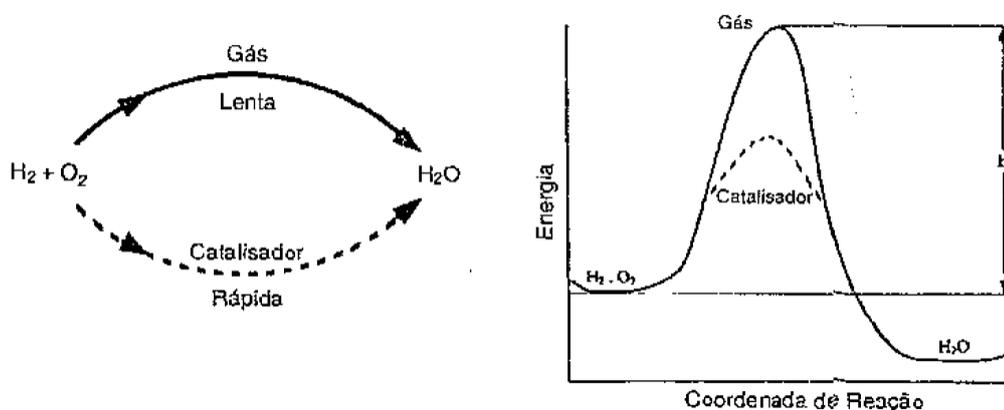


Figura 26 – Rotas e mecanismos de reação entre o H_2 e o O_2 para formar vapor d'água, com e sem catalisador.

Fonte: FOGLER, 2009, p. 522.

9.3.2 Revisão dos usos da lama vermelha como catalisador

Os usos da lama vermelha como catalisador vêm sendo investigados desde o início da década de 1950, com o primeiro trabalho investigando aplicações dos resíduos de bauxita neste sentido, sendo o trabalho publicado por Weller *et al.* (1950), no qual os autores realizaram estudos sobre a hidrogenação do carvão mineral em batelada, sob pressão e a altas temperaturas, dentro de autoclaves.

Segundo Ismail *et al.* (2019), a hidrogenação do carvão mineral é um tipo de processo de liquefação direta deste combustível fóssil através do qual o carvão mineral é convertido em hidrocarbonetos leves, podendo estes serem líquidos ou gasosos. Ismail e Jacob destacam, ainda, que os tipos de catalisadores mais comumente utilizados para que essa reação seja economicamente e energeticamente viável são os catalisadores com suporte metálico, dentre os quais podem ser destacados o molibdato de cobalto, com suporte de alumina, e o óxido e o sulfeto de molibdênio, com suporte de alumina e sílica.

Dentre os diversos catalisadores que tiveram, por Weller *et al.* (1950), suas eficiências catalíticas testadas para a hidrogenação do carvão, a lama vermelha foi o único catalisador à base de óxido de ferro que obteve uma boa eficiência para a catálise da hidrogenação do carvão mineral, atestando assim, que este resíduo industrial pode ser empregado como catalisador para esta reação química que é muito importante no âmbito da produção de combustíveis através de rotas de produção alternativas.

Pratt e Christoverson (1982), ao analisarem a hidrogenação da naftalina em tetralina, catalisada por lama vermelha, constataram que a catálise da reação por LV resulta uma conversão de apenas 3,55% da naftalina em tetralina, sendo que a conversão máxima de naftalina em tetralina se dá apenas quando os RB são tratados com dióxido de titânio.

Segundo Pratt e Christoverson (1982), o tratamento consiste na adição de 20% p. de TiO_2 à lama vermelha e, em seguida, na digestão ácida e reprecipitação do resíduo tratado. Os resultados obtidos por Pratt e Christoverson (1982) indicam que a catálise da hidrogenação da naftalina e da tetralina por LV tratada com TiO_2 , nas condições de condução da reação definidas pelos autores, resultou em uma conversão de 58% da naftalina em tetralina.

Em seguida, Klopries *et al.* (1990), ao investigarem a hidroliquefação da palha de centeio, tendo a lama vermelha e o óxido de cobalto/trióxido de molibdênio (CoO-MoO_3) como catalisadores, constataram que o CoO-MoO_3 possui uma eficiência catalítica levemente superior à da lama vermelha para a reação analisada, com os RB possuindo uma eficiência catalítica satisfatória para a reação, apenas na presença de enxofre.

Apesar dos resultados obtidos, Klopries *et al.* (1990) ainda recomendam o uso da LV como catalisador da reação de hidroliquefação da palha do centeio, uma vez que a lama vermelha, além de ser mais barata que o catalisador, à base de cobalto e molibdênio, testado, os RB são materiais mais baratos e de mais fácil obtenção.

Eamsiri *et al.* (1992), ao testarem a eficiência catalítica da lama vermelha para a hidrogenação de carvões minerais de alta e baixa qualidade, além de compostos aromáticos, como naftaleno, fenantreno e píreno, constataram que a ativação dos resíduos de bauxita por tratamento ácido aumenta significativamente a eficiência catalítica da lama vermelha para as reações analisadas, aumentando assim, a conversão dos reagentes em hidrocarbonetos leves.

Além disso, Álvarez *et al.* (1999) elaboraram um novo método de ativação da lama vermelha que produziu um catalisador com eficiência catalítica e vida útil superior ao do catalisador de lama vermelha ativada com dióxido de titânio, testado por Pratt e Christoverson (1982), de modo a produzir um catalisador à base de LV que tivesse uma eficiência catalítica igual ou superior às dos catalisadores desenvolvidos por Pratt e Christoverson (1982).

O método de ativação da lama vermelha proposto por Álvarez *et al.* (1999) consiste na dissolução da lama vermelha em uma mistura de ácido clorídrico (HCl) e ácido fosfórico (H_3PO_4) e, em seguida, ferver a solução resultante, adicionar solução aquosa de amônia até que

a solução atinja um pH igual a 8, para em seguida, filtrar, lavar e calcinar o precipitado resultante, que basicamente, é o catalisador obtido.

Conforme indicam os resultados obtidos por Álvarez *et al.* (1999), o catalisador obtido teve uma eficiência catalítica superior aos dois catalisadores testados por Pratt e Christoverson (1982), indicando assim, que Álvarez *et al.* (1999) conseguiram alcançar os objetivos de seu estudo, uma vez que obtiveram um catalisador mais eficiente para a reação de hidroliquefação da palha de centeio, conseguindo conseqüentemente, uma maior conversão e um maior rendimento de produto.

Yanik *et al.* (2001), ao investigarem os efeitos catalíticos da lama vermelha na degradação de misturas de polímeros, contendo PVC, em óleo combustível, constataram que mesmo que tenham fixado todo o gás cloreto de hidrogênio resultante da degradação da mistura polimérica, as amostras de óleo combustível resultantes da degradação catalisada pela LV e pelos outros catalisadores analisados por Yanik *et al.* (2001)

Karimi *et al.* (2010), ao investigarem o uso de lama vermelha reduzida como catalisador da redução dos compostos orgânicos oxigenados, presentes no óleo vegetal resultante da pirólise de sementes de cânhamo, a uma pressão de 800 psi e a uma temperatura na faixa de 350 a 365°C, constataram que o tipo de lama vermelha testada foi muito eficiente em promover a redução dos grupos funcionais oxigenados de vários compostos orgânicos presentes no bio-óleo analisado.

Esses grupos funcionais foram convertidos em CO₂ e água, resultando assim em um bio-óleo mais estável e com maior vida útil, uma vez que os sem os grupos funcionais oxigenados, os compostos orgânicos presentes no bio-óleo melhorado por Karimi *et al.* (2010) já possuem uma tendência bem menor a formar resinas.

Dunens *et al.* (2010) realizaram com sucesso a síntese de nanotubos de carbono com várias paredes, utilizando lama vermelha como catalisador da reação de criação dos nanotubos de carbono, com Liu *et al.* (2013) tendo investigado experimentalmente o uso da lama vermelha como catalisador para a síntese de biodiesel.

Resende (2012) investigou os usos da lama vermelha como catalisador em processos reacionais redutivos e oxidativos (REDOX), analisando as eficiências catalíticas da lama vermelha *in natura*, carbonatada e tratada com ácido nítrico, para as reações de oxidação do

azul de metileno e do dibenzotiofeno (DBT), além de um coprocesso para a conversão do glicerol.

Os resultados obtidos por Resende (2012) indicam que os três tipos de lama vermelha são catalisadores que possuem uma boa eficiência catalítica para as três reações analisadas, com a lama vermelha tratada por ácido nítrico tendo a maior eficiência catalítica dentre os três tipos de LV analisadas; fato este que levou Resende (2012) a concluir que o tratamento ácido foi a principal causa da melhoria da eficiência catalítica da lama vermelha para os processos reacionais REDOX analisados.

Em seu trabalho, Eid (2015) utilizou lama vermelha calcinada a 1000°C como catalisador do craqueamento térmico catalítico (CTC) de resíduos provenientes de caixas retentoras de gordura, realizando depois, a destilação dos produtos líquidos orgânicos (PLO) obtido, de modo a avaliar as frações leves e pesadas de PLO destilados, a fim de avaliar a aplicabilidade dos produtos obtidos como biocombustíveis.

Eid (2015) determinou que a melhor condição para a realização do craqueamento térmico catalítico de resíduos provenientes de caixas retentoras de gordura é quando o CTC dos resíduos de caixa de gordura é feito com uma dosagem de 5% p. de LV calcinada, obtendo-se nessas condições, um produto com os menores valores de índice de acidez, viscosidade cinemática e densidade, além de maiores conversões de reagente em produto, sendo o produto obtido através da realização de CTC nessa condição, rico em hidrocarbonetos na faixa do diesel verde pesado.

Kurtoğlu e Uzun (2016) investigaram o uso da lama vermelha como catalisador para a produção de gás hidrogênio a partir de amônia (NH₃), com os autores obtendo resultados promissores que indicam que a lama vermelha catalisa de forma bastante eficiente a reação de produção de H₂ a partir de NH₃ sem que haja a produção de óxidos de carbono, o que torna assim, o processo reacional menos agressivo ao meio ambiente.

Além do aspecto ambiental, outro fator que atesta a viabilidade do processo para uma possível aplicação em escala industrial são as taxas consideráveis de produção hidrogênio. Para o catalisador de lama vermelha pura, a taxa de produção de H₂ foi de 72 mmol de H₂ . h⁻¹ . g_{catalisador}, ao passo que para o catalisador de lama vermelha tratada com HCl foi mais de duas vezes mais alta, sendo de 196 mmol de H₂ . h⁻¹ . g_{catalisador}.

Ademais, Kurtoğlu e Uzun (2016) ressaltam que as condições reacionais que permitem a máxima conversão de amônia em hidrogênio são uma temperatura de 700°C e um tempo de contato, entre o catalisador e os reagentes, igual a 72h.

Dessa forma, os resultados obtidos por Kurtoğlu e Uzun (2016) corroboram os resultados obtidos por Álvarez *et al.* (1999) e Resende (2012), que foram estudos que demonstraram que as lamas vermelhas que passaram por meio de tratamento ácido obtiveram uma eficiência catalítica maior para as reações contra as quais suas eficiências catalíticas foram testadas, provando assim, a teoria apresentada por Resende (2012), que o tratamento ácido melhora as propriedades catalíticas da lama vermelha.

Gao *et al.* (2020) investigaram o impacto de precursores à base de cério (Ce) nas propriedades de superfície da lama vermelha modificada para fins de uso como catalisador para a reação de redução catalítica seletiva de óxidos de nitrogênio, com os catalisadores de lama vermelha modificada por cério (LV-Ce) possuindo uma alta eficiência catalítica para a reação de redução catalítica seletiva de óxidos de nitrogênio, o que é atestado pelo fato de que Gao *et al.* (2020) constataram que os catalisadores de LV-Ce promoveram uma conversão de NO_x em produtos, acima de 90%, a uma temperatura entre os 200 e os 300°C, com os átomos de oxigênio de superfície cristalina do catalisador formando pontes Fe-O-Ce que promovem ainda mais a redutibilidade dos óxidos de nitrogênio.

Dentre os estudos recentes voltados para a aplicação de resíduos de bauxita como catalisador, destaca-se o estudo realizado por Russkikh *et al.* (2020), no qual os autores realizaram o tratamento da lama vermelha com soluções de carbonato e hidróxido de potássio, de modo a realizar uma promoção de potássio na lama vermelha, com o objetivo de criar um catalisador que permita uma hidrogenação eficiente de CO₂ em olefinas, que são hidrocarbonetos com pelo menos uma ligação dupla ao longo de suas cadeias carbônicas.

Os resultados obtidos por Russkikh *et al.* (2020) indicam que as melhores condições para a realização da reação de hidrogenação de CO₂ em olefinas são uma pressão de 30 bar, temperatura de 375°C e uma taxa de vazão de gases reagentes por massa de catalisador igual 9600 mL.g⁻¹.h⁻¹ em cada canal de alimentação, com as frações de gases alimentadas sendo 72% H₂, 24% CO₂ e 4% He por padrão e, a massa de catalisador colocada em cada reator sendo de 50 mg.

Conforme indicado pelos resultados obtidos por Russkikh *et al.* (2020), quando a reação foi realizada nas condições ótimas apontadas, obteve-se uma conversão de CO₂ em

olefinas leves (C_2 - C_4) igual a 45% e uma seletividade de 36% para o CO_2 , o que segundo Russkikh *et al.* (2020) é suficiente para considerar a eficiência catalítica da lama vermelha modificada por potássio, para a reação analisada, como comparável à performance dos melhores catalisadores existentes atualmente.

Conforme indicado pelos resultados obtidos por Russkikh *et al.* (2020), as olefinas obtidas através da hidrogenação catalítica do dióxido de carbono consistem nos gases eteno ou etileno, propeno ou propileno e, buteno. Dessa forma, pode-se considerar que os resultados do estudo obtido por Russkikh *et al.* (2020) são suficientes para se considerar a realização de estudos de simulação do comportamento do processo reacional analisado a nível industrial, uma vez que as olefinas obtidas consistem em produtos químicos de alto valor agregado, que podem ser utilizados como matérias-primas para as indústrias química, petroquímica, alimentícia e, até mesmo, de semicondutores.

9.4 EXTRAÇÃO DE ELEMENTOS TERRAS RARAS (ETR) E OUTROS METAIS VALIOSOS

A extração de elementos terras raras (ETR) e outros metais valiosos é a aplicação mais antiga de que se tem notícia para os resíduos provenientes do refino da bauxita, com o primeiro trabalho acerca da aplicação dos RB sendo o trabalho realizado por Pedersen (1924), no qual o autor designou um processo para a extração de alumina e ferro metálico da lama vermelha.

O processo de extração de alumina, ferro metálico e outros metais valiosos da lama vermelha, designado por Pedersen (1924), na Noruega, ficou conhecido como Processo Pedersen. No entanto, mesmo com a criação desse processo tendo sido há quase cem anos, o processo nunca foi adotado em larga escala para a produção de alumina, como uma alternativa ao Processo Bayer, sendo adotado apenas em escala semi-industrial, muito por conta de problemas que impediam uma separação do ferro metálico da escória, ao final do processo.

De acordo com Tilley *et al.* (1927), o principal problema que impedia uma separação efetiva do ferro metálico da escória resultante do Processo Pedersen era a alta solubilidade do ferro metálico na solução resultante, o que fazia com que o Processo Pedersen apenas produzisse soluções metálicas ricas em alumina e ferro, a partir da lama vermelha.

Swarup e Sharma (1945), no qual os autores desenvolveram um método para a extração do dióxido de titânio (TiO_2) presente na lama vermelha. De acordo com sua data de

publicação, é correto afirmar que o trabalho publicado por Swarup e Sharma (1945) se deu no contexto da Segunda Guerra Mundial. Nessa época, conforme relatado por Appleton (1940), compostos de titânio, como o material cerâmico carbeto de titânio (TiC), já eram utilizados como materiais de ligantes em soldas, especialmente para a fabricação equipamentos bélicos, como munições, e também, para a fabricação de componentes de aviões caça, como os exaustores.

Além disso, um pouco antes do início da guerra, Campbell (1939) já relatava que o titânio já era usado para a fabricação de ligas de titânio, dentre as quais, são destacadas por Campbell (1939) o ferrocronotitânio, ferrotitânio, cuprotitânio, manganotitânio e o Inconel, as quais, obviamente, tiveram aplicações militares ao longo da guerra.

Dessa forma, é correto afirmar que o trabalho conduzido por Swarup e Sharma (1945) deu luz ao fato de que a lama vermelha é uma fonte alternativa de titânio, providenciando assim, uma forma alternativa de se obter materiais de titânio que pudessem ser utilizados para contribuir para o esforço de guerra aliado e, que fosse amigável ao meio ambiente, uma vez que ao se utilizar a lama vermelha como matéria-prima para processos industriais, se faz uma contribuição para reduzir os níveis desse resíduo em estocagem.

Richardson (1959) estudou a variação das concentrações de tório (Th) e urânio (U) ao longo de toda a cadeia de produção do alumínio primário, investigando as variações das concentrações destes ETR ao longo das etapas da cadeia de produção analisada, conforme mostrado na Tabela 15, a seguir.

Tabela 15 – Etapas de variação da concentração de elementos terras raras ao longo da cadeia de produção do alumínio primário

Etapas	Material(is) de origem	Material(is) de destino
Formação da bauxita	Rocha matriz	Bauxita
Refino da bauxita	Bauxita	Lama vermelha e alumina
Redução da alumina	Alumina	Alumínio

Fonte: Adaptado de RICHARDSON, 1959.

Em seu trabalho, Richardson (1959) determina que o material resultante da produção do alumínio primário, com maior concentração de tório e urânio é a lama vermelha, com a maior variação da concentração ocorrendo durante a etapa de refino da bauxita, que é a etapa da cadeia de produção do alumínio primário na qual o Th e o U são concentrados nos resíduos resultantes do refino de bauxita.

Conforme indicado pelos resultados das análises de amostras de bauxita e lama vermelha, obtidos por Richardson (1959), 73-96% do tório, presente na bauxita que entrou no processo de refino, foi concentrado na lama vermelha, ao passo que 82-93% do urânio, inicialmente presente na bauxita, foi concentrado nos resíduos resultantes do processo de refino.

Dessa forma, os resultados obtidos por Richardson permitem inferir que como a lama vermelha é o material resultante do Processo Bayer, mais rico em tório e urânio, é correto afirmar que métodos de extração podem ser desenvolvidos para efetivamente extrair esses elementos terras raras dos resíduos de bauxita.

Logomerac (1979) desenvolveu o primeiro processo complexo e integrado que, além de permitir uma separação e extração efetiva do ferro metálico da lama vermelha, também permite a extração de vários outros produtos valiosos dos resíduos de bauxita, como TiO_2 , resíduos sólidos que servem como matéria-prima para fabricação de fertilizantes, sílica em gel e, até mesmo, alumina.

Dessa forma, é correto afirmar que o Processo Logomerac é um dos processos com maior potencial para extração de produtos de maior valor agregado da lama vermelha. O fluxograma deste processo é mostrado, a seguir, na Figura 27.

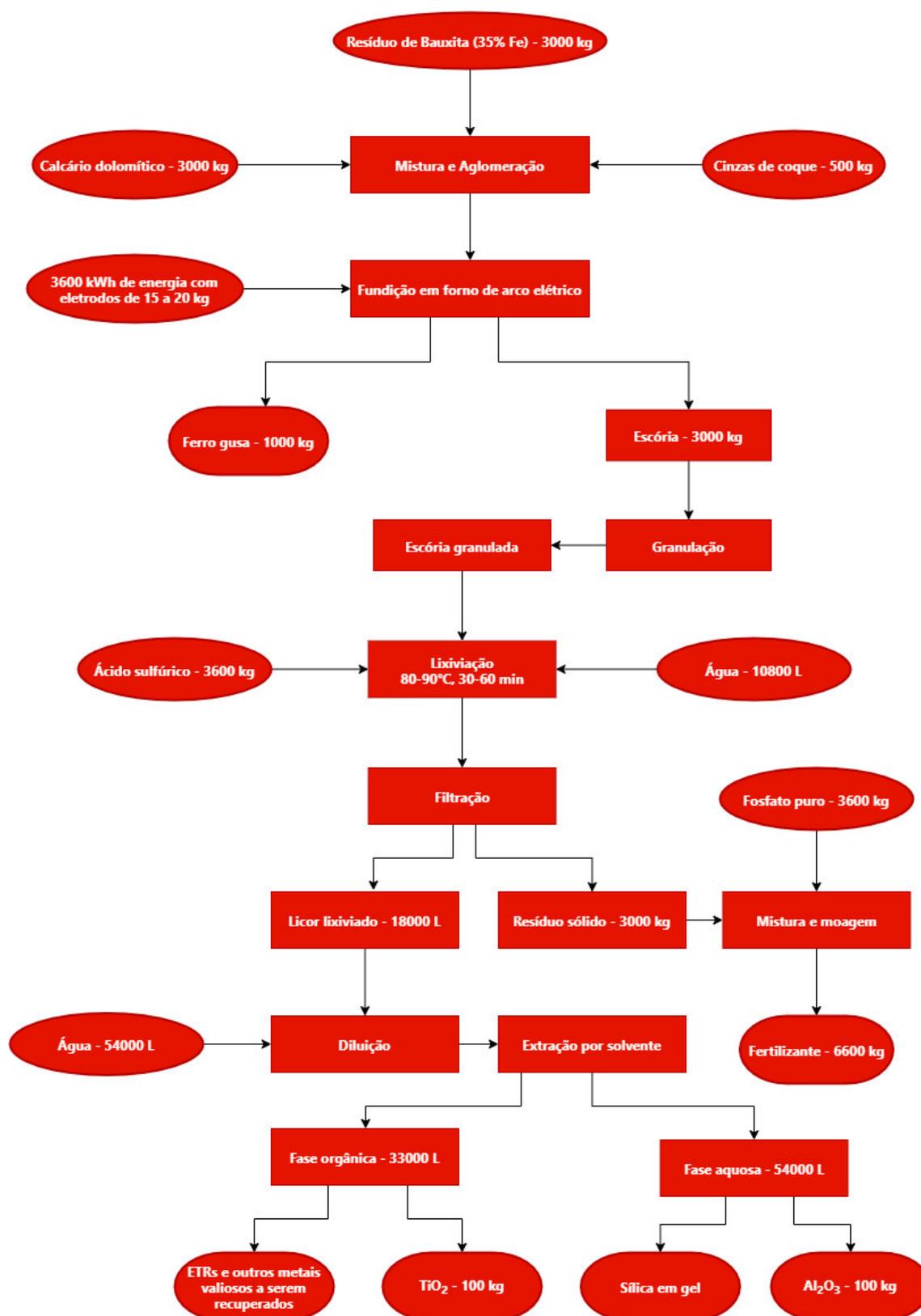


Figura 27 – Fluxograma do Processo Logomerac. Fonte: Adaptado de LOGOMERAC (1979).

Mesmo o Processo Logomerac sendo um processo promissor para a extração integrada de vários produtos de considerável valor agregado, a partir da lama vermelha, este não foi adotado em larga escala a nível mundial, a partir da década de 1980. A principal barreira para a adoção do Processo Logomerac a nível mundial, foi apontada por Ochsenkühn-Petropoulou *et al.* (2002) e Borra *et al.* (2016), é o alto consumo energético desse processo.

Conforme pode ser visto na Figura 27, e apontado por Borra *et al.* (2016), o consumo de energético por parte do Processo Logomerac é de 3600 kWh, o que segundo Borra *et al.* (2016) é muito alto se comparado aos demais processos de produção de ferro gusa, que possuem uma demanda energética média de, aproximadamente, 1500 kWh.

Dessa forma, isso significa que a demanda energética do Processo Logomerac é mais de duas vezes maior que a dos demais processos de produção de ferro gusa, o que indica que mesmo que o processo possua um alto rendimento para a produção de ferro gusa, o processo se torna energeticamente inviável como processo alternativo aos demais processos de produção de ferro gusa, o que conseqüentemente, torna o processo economicamente inviável, explicando assim, a sua não-adoção em escala industrial para a produção de ferro gusa e alumina, além de outros produtos de valor agregado.

A partir da década de 1990, vários estudos começaram a ser feitos no sentido de recuperar elementos terras raras a partir da lama vermelha. Ochsenkühn-Petropulu *et al.* (1995) realizaram com sucesso a separação dos compostos de escândio, de ítrio e outros ETR presentes na lama vermelha, após extrair com sucesso os elementos terras raras dos resíduos de bauxita. De acordo com Ochsenkühn-Petropulu *et al.* (1995), a recuperação de escândio foi feita de forma muito eficiente, com 93% do Sc sendo recuperado.

Em seguida, Ochsenkühn-Petropulu *et al.* (1996) realizaram a extração de ítrio e elementos lantanídeos da lama vermelha através de lixiviação seletiva. Os resultados obtidos por Ochsenkühn-Petropulu *et al.* (1996) indicam que a separação do ítrio foi feita de forma muito eficiente, com a porcentagem de ítrio recuperado sendo de aproximadamente 90%.

Além disso, os resultados do estudo conduzido por Ochsenkühn-Petropulu *et al.* (1996), também, indicam que os níveis de eficiência de extração de lantanídeos da lama vermelha variaram de acordo com seu tipo. Para os lantanídeos pesados, como os disprósio (Dy), érbio (Er) e itérbio (Yb), a eficiência de extração da LV foi de até 70%; para os lantanídeos médios, como o neodímio (Nd), samário (Sm), európio (Eu) e gadolínio (Gd), a

eficiência extração dos RB foi de até 50%; já para os lantanídeos leves, como o lantânio (La), cério (Ce) e praseodímio (Pr), a eficiência de extração destes elementos da LV foi de até 30%.

A partir dos resultados obtidos no seu estudo publicado em 1995, Ochsenkühn-Petropoulu *et al.* (2002), construíram uma planta piloto para estudar e avaliar o potencial e a viabilidade da aplicação em escala industrial da extração de escândio da lama vermelha, estudada por Ochsenkühn-Petropoulu *et al.* (1995).

Os resultados obtidos por Ochsenkühn-Petropoulu *et al.* (2002) foram satisfatórios, indicando que até 73% do escândio presente na LV foi extraída desse resíduo industrial durante a operação da planta piloto, atestando assim, que o processo de extração de Sc dos RB, desenvolvido Ochsenkühn-Petropoulu *et al.* (1995) é viável para aplicação em escala industrial. O fluxograma do processo de operação da planta piloto de extração de escândio da lama vermelha, desenvolvido por Ochsenkühn-Petropoulu *et al.* (2002), é mostrado a seguir, na Figura 28.

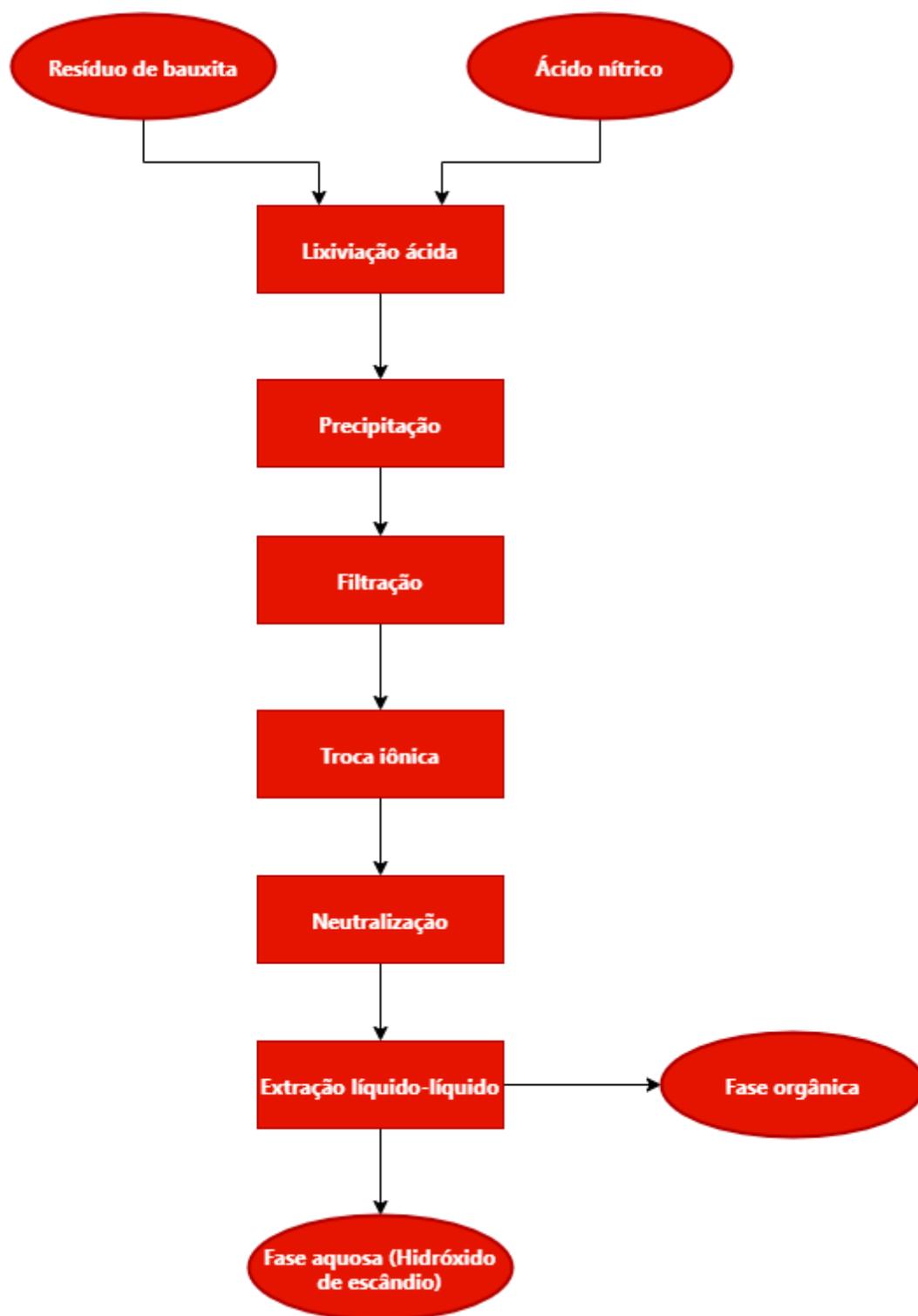


Figura 28 – Processo de operação de planta piloto de extração de escândio de resíduos de bauxita. Fonte: Adaptado de OCHSENKÜHN-PETROPOULOU *et al.*, 2002; BARDANO; GOMES, 2015.

No entanto, mesmo com Ochsenkühn-Petropoulou *et al.* (2002) atestando a viabilidade do seu processo piloto para a extração de escândio a partir da lama vermelha, Wang *et al.* (2011)

afirmam que esse processo não é economicamente viável, por conta do baixo teor de escândio e da alta quantidade de impurezas na lama vermelha, impurezas estas que podem se dissolver na solução final rica em escândio, e assim, dificultar a extração do Sc dos RB. Segundo Wang *et al.* (2011), é da seguinte forma que se dá a dissolução de impurezas provenientes dos RB na solução rica em escândio, produzida ao final do processo de extração de Sc da LV, desenvolvido Ochsenkühn-Petropoulou *et al.* (2002).

No processo de extração de escândio da lama vermelha, grandes quantidades de impurezas provenientes dos resíduos de bauxita são dissolvidas durante a lixiviação ácida e reabsorvidas pela resina de troca iônica utilizada no processo, o que consequentemente, diminui a capacidade de troca iônica da resina. Além disso, o processo de extração consome grandes quantidades de ácidos, o que resulta em um consumo de grandes quantidades de bases necessárias para sua neutralização e, consequentemente, em elevados custos operacionais. (WANG *et al.*, 2011)

Com base nas colocações feitas por Wang *et al.* (2011) a respeito da viabilidade econômica do processo de extração de escândio da lama vermelha, desenvolvido por Ochsenkühn-Petropoulou *et al.* (2002), Wang *et al.* (2013) desenvolveram um processo de extração de escândio da lama vermelha, baseado em lixiviação ácida e extração por solvente orgânico, sendo os solventes orgânicos utilizado por Wang *et al.* (2013), o ácido oxálico e o ácido di-2-etil-hexil-fosfórico. O fluxograma do processo de extração de Sc de RB é mostrado a seguir, na Figura 29.

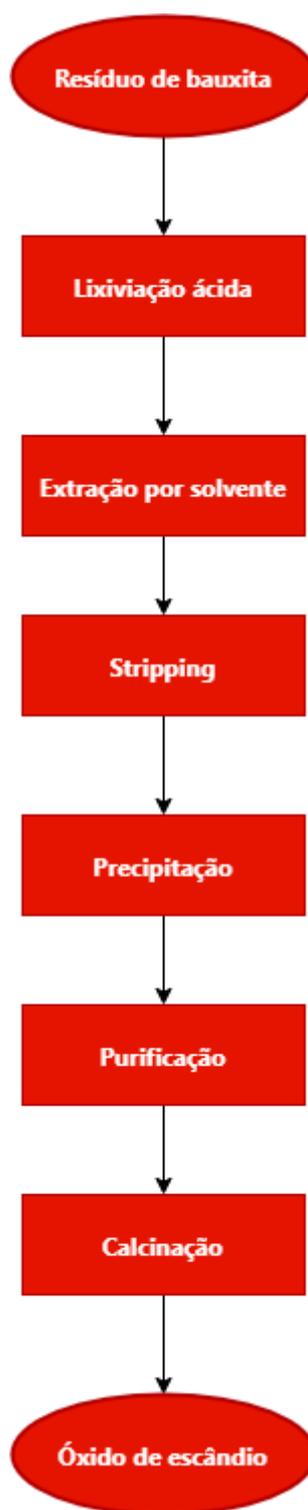


Figura 29 – Processo de extração de escândio da lama vermelha baseado em lixiviação ácida e extração por solvente orgânico. Fonte: Adaptado de WANG *et al.*, 2013; BARDANO; GOMES, 2015.

Segundo Bardano e Gomes (2015), o processo de extração de escândio da lama vermelha, desenvolvido por Wang *et al.* (2013), é bastante promissor, uma vez que permite uma

extração de 99% do Sc contido na LV, com praticamente nenhum óxido de ferro presente na solução de escândio, com as etapas subsequentes do processo permitindo a que a solução de escândio extraída seja convertida em óxido de escândio (Sc_2O_3) de alta pureza. Dessa forma, Bardano e Gomes (2015) sugerem que, para que o processo desenvolvido por Wang *et al.* (2013) seja melhor aproveitado, seja construída uma planta piloto para que seja avaliado o comportamento do processo a um nível semi-industrial.

No entanto, com os avanços da tecnologia, principalmente das tecnologias computacionais voltadas para a simulação de processos químicos industriais, é mais adequado que sejam feitas simulações computacionais do processo a nível industrial, uma vez que os principais simuladores de processos químicos, disponíveis comercialmente, além de permitir simular e prever com precisão o comportamento e o rendimento do processo a nível industrial, permitem uma previsão mais econômica do comportamento do mesmo a nível industrial.

Além disso, devido à recente pandemia de COVID-19, muitas equipes de diversas empresas passaram a trabalhar de forma distribuída, ou seja, com funcionários trabalhando remotamente, a partir de casa, ou em qualquer lugar que lhes for conveniente. Dessa forma, atualmente, o uso de simuladores computacionais para prever o comportamento e o rendimento de processos químicos industriais, além de ser uma alternativa mais econômica, também, se tornou uma alternativa mais segura do ponto de vista sanitário em relação à construção e operação de plantas piloto, contribuindo assim, para a aceleração da tendência de cair em desuso a necessidade da construção de plantas piloto para a previsão do comportamento de processos químicos a nível industrial.

Outro trabalho bastante promissor na área de estudo da extração de ETR e outros metais valiosos da lama vermelha é um estudo realizado por Gu e Wang (2013), no qual os autores realizaram a lixiviação ácida de resíduos de bauxita, provenientes tanto do Processo Bayer (LV-PB), quanto do Processo de Sinterização (LV-PS), para extrair o tório e o urânio contidos nesses resíduos.

Os resultados obtidos por Gu e Wang (2013) foram promissores no que tange à extração do urânio da lama vermelha, com 80% do urânio da lama vermelha do Processo Bayer sendo extraído do resíduo e 50% do urânio da lama vermelha proveniente do Processo de Sinterização tendo sido extraído do resíduo. No caso do tório, as quantidades extraídas já foram mais baixas, com 15% do tório da LV-PB tendo sido extraído do resíduo e 22% do tório presente na LV-PS tendo sido extraído.

Gu e Wang (2013) atribuem esses resultados ao fato de que o urânio é menos solúvel na lama vermelha do que o tório, o que faz com que seja mais fácil extrair dos RB o urânio do que o tório atribuindo esse fato à existência de forças intermoleculares mais forte entre o tório e outros elementos presentes na LV, quando comparadas às mesmas forças intermoleculares que são responsáveis pelas interações entre o urânio e outros elementos presentes nos RB.

Mesmo em meio a uma pandemia, os anos de 2020 e 2021 trouxeram estudos promissores na área de extração de elementos terras raras e outros metais valiosos, com o primeiro estudo a ser destacado, sendo o estudo realizado por Ding *et al.* (2020). Em seu estudo, Ding *et al.* (2020), desenvolveram um novo método para extração de ferro de lama vermelha refratária proveniente da China.

Por conta de ter propriedades que lhe conferem resistência ao calor, o processamento da lama vermelha chinesa analisada por Ding *et al.* (2020) se torna teoricamente mais difícil, com outro desafio para o processamento pirometalúrgico deste resíduo industrial sendo o seu baixo teor de óxidos de ferro que, conforme determinado por Ding *et al.* (2020), foi de 19,86% p.

No entanto, o processo de redução dos óxidos de ferro, presentes na lama vermelha chinesa, em ferro metálico, desenvolvido por Ding *et al.* (2020), foi altamente eficiente em promover a redução dos óxidos de ferro, presentes lama vermelha chinesa analisada por Ding *et al.* (2020), em ferro metálico.

O processo de extração de ferro da lama vermelha desenvolvido por Ding *et al.* (2020) consiste em duas etapas, sendo a primeira, a tostagem dos resíduos de bauxita sob atmosfera redutora, com uso de coque como agente redutor, e a segunda, a separação magnética do ferro metálico produzido. De acordo com Ding *et al.* (2020), o processo desenvolvido pelos mesmos para extração de ferro da lama vermelha foi altamente eficiente, apresentando uma eficiência média de extração de ferro igual a 92,08%.

Em seu trabalho, Lazou *et al.* (2021), através de uma rota eletroquímica, conseguiram melhorar de forma significativa o Processo Pedersen de forma a praticamente viabilizar a sua aplicabilidade a nível industrial, tendo resíduos de bauxita como a principal matéria-prima do processo.

No trabalho conduzido por Lazou *et al.* (2021), ao final da condução eletroquímica do Processo Pedersen, foram formadas duas fases bem definidas, sendo estas a fase ferro e a fase

escória, com a fase ferrosa tendo sido completamente separada da não-ferrosa, sem que houvesse qualquer dissolução na escória do ferro metálico obtido ao final do processo.

Além disso, Lazou *et al.* (2021) ainda informam que ao final da condução eletroquímica do Processo Pedersen, além da alumina recuperada, ao final da lixiviação alcalina da escória, é obtido um subproduto conhecido como lama cinza, rico em óxidos de cálcio e que pode ser usado como matéria-prima para processos de fabricação de cimentos e fertilizantes caso seja classificado como um produto inerte, com o ferro metálico obtido podendo ser usado para a fabricação de aço.

Ademais, Zinoveev *et al.* (2021) desenvolveram um processo de extração de ferro de lama vermelha russa, que consiste em duas etapas principais, sendo estas a redução carbotérmica dos óxidos de ferro, presentes nos resíduos de bauxita, em ferro metálico, a uma temperatura entre os 1000°C e os 1400°C, seguida da separação magnética do ferro metálico.

Zinoveev *et al.* (2021), ao investigarem o mecanismo de redução carbotérmica dos óxidos de ferro presentes na lama vermelha russa, originária da Fábrica de Alumínio de Ural, constataram, com base nos dados experimentais do processo desenvolvido, que caso as primeiras etapas da redução dos óxidos de ferro sejam realizadas de forma rápida, a uma temperatura ótima de 1200°C, é promovida uma redução quase completa dos óxidos de ferro presentes nos resíduos de bauxita, com as partículas de ferro metálico resultantes sendo grandes o suficiente para serem separadas da escória por meio de separação magnética.

Botelho Júnior *et al.* (2021) realizaram um trabalho no qual determinaram por meio de simulações termodinâmicas computacionais que a 45°C e utilizando ácido sulfúrico de concentração 2 mol.L⁻¹ como agente lixiviante, é possível extrair até 95% do ítrio presente na lama vermelha.

Por fim, Basturkcü (2021) alcançou níveis de eficiência extrativa excelentes ao realizar a extração de lantânio e ítrio da lama vermelha, através da eliminação das impurezas iônicas presentes nesse resíduo industrial, por meio de lixiviação em dois estágios. Conforme os resultados obtidos por Basturkcü (2021), quando se extrai lantânio e ítrio de uma lama vermelha com 40% de sólidos, é possível extrair 90,1% do lantânio e 91,6% do ítrio contidos no resíduo.

Dessa forma, é correto afirmar que os estudos realizados por Lazou *et al.* (2021), Botelho Júnior *et al.* (2021) e Basturkcü (2021) são trabalhos bastante promissores no que diz respeito à aplicação dos resultados de suas pesquisas a nível industrial, uma vez que além de o

Processo Pedersen possibilitar uma produção eficiente de vários produtos de considerável valor agregado ao final do processo, Botelho Júnior *et al.* (2021) e Basturkcü (2021), através de seus trabalhos abriram as portas para a possibilidade de se estudar o comportamento, a nível industrial, dos processos de extração de elementos terras raras abordados por esses autores, podendo o estudo ser feito através de simulações computacionais.

10 IMPORTÂNCIA DO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE BAUXITA

10.1 IMPORTÂNCIA AMBIENTAL

Em relação à periculosidade dos resíduos de bauxita para o meio ambiente, a literatura apresenta informações desconexas. De acordo com Klauber *et al.* (2011), países, como Canadá, Estados Unidos e países da União Europeia, não classificam a lama vermelha como um resíduo perigoso, não impondo, também, controles regulatórios para o seu transporte. Do ponto-de-vista do reaproveitamento desses resíduos, isso se torna algo vantajoso, uma vez que a não-restrição ao transporte dos resíduos de bauxita nos países mencionados facilita a logística envolvendo a venda desses resíduos para reaproveitamento em outras pesquisas e outros possíveis processos industriais que tenham a lama vermelha como matéria-prima.

Miura (2016) destaca que, no Brasil, apesar de a Resolução CONAMA nº 452, de 2 de julho de 2012, não tratar especificamente deste material, o mesmo se enquadra em seu anexo III como resíduo corrosivo, que pode provocar sérios danos quando em contato com tecidos vivos e, como resíduo ecotóxico, que é como são definidos os resíduos que podem ocasionar efeitos tóxicos à biota se liberados ao meio ambiente. Além disso, Miura ressalta que alguns autores consideram os resíduos de bauxita como resíduos tóxicos, com Hind *et al.* (1999) classificando a lama vermelha dessa maneira por conta do seu elevado teor de hidróxido de sódio, que pode ser a causa de sérios danos ambientais caso esse resíduo seja lançado na natureza.

Além disso, no Brasil, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, também conhecida como Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) classifica os resíduos de bauxita como resíduos industriais, por serem gerados em processos produtivos que ocorrem em plantas industriais. Além disso, a PNRS, em seu artigo 47, proíbe a disposição de resíduos industriais em quaisquer corpos hídricos, sendo dessa forma, correto afirmar que a disposição de resíduos de bauxita em alto mar é, atualmente, proibida pela legislação ambiental brasileira, com o crime

ambiental caracterizado por essa forma de disposição de LV, sendo definido, com suas penas também sendo definidas, pelo artigo 54 da Lei nº 9605, de 12 de fevereiro de 1998, também conhecida como Lei de Crimes Ambientais.

Em processos de refino de bauxita, a taxa de geração de resíduos, tipicamente, se encontra na faixa de 0,5 a 2,0 toneladas de lama vermelha seca por tonelada de alumina produzida (NUNN, 1998). Komnitsas *et al.* (2004), no entanto, sugerem que a taxa de geração de RB depende da qualidade da bauxita refinada, variando de 0,3 toneladas de lama vermelha seca por tonelada de alumina produzida, para as bauxitas de alta qualidade ou alto teor de Al_2O_3 , a 2,5 toneladas de lama vermelha seca por tonelada de alumina produzida, para as bauxitas de baixa qualidade ou baixo teor de Al_2O_3 .

Segundo Silva Filho *et al.* (2007), não se tem muito conhecimento acerca da taxa de geração de resíduos de bauxita em várias localidades do Brasil e do mundo, com várias empresas decidindo não liberar dados acerca da geração de resíduos de bauxita muito frequentemente, por conta de questões ligadas à preservação do sigilo operacional. No entanto, no caso de apenas uma refinaria brasileira, a empresa responsável por sua operação disponibilizou dados a respeito da taxa de geração de resíduos de bauxita em sua refinaria.

De acordo com a Norsk Hydro (2021), a taxa de geração de resíduos de bauxita em sua refinaria localizada em Barcarena, PA, foi de aproximadamente, 0,91 toneladas de lama vermelha seca por tonelada de alumina produzida, tendo a quantidade total de resíduos de bauxita produzida ao longo de 2020, na mesma refinaria, sido de aproximadamente 4,9 milhões de toneladas.

Silva Filho *et al.* (2007) afirmam que à época da realização de seu trabalho não haviam muitos dados disponíveis na literatura a respeito da produção de resíduos de bauxita ao redor do mundo. Essa questão só foi solucionada apenas recentemente, por Wang e Liu (2021), em seu trabalho no qual fazem uma revisão de literatura acerca dos usos da lama vermelha como material de remediação ambiental.

Em seu trabalho, Zeng *et al.* (2020), destacam que a taxa média de reaproveitamento de resíduos de bauxita ao redor do mundo é de, em média, 15%. Ademais, o USGS (2021) destaca que é estimado que foram produzidas 133 milhões toneladas de alumina, no mundo todo, durante o ano de 2020, o que implica que a quantidade de resíduos de bauxita produzida ao redor do mundo, no ano de 2020, é ainda maior. Na Tabela 16, a seguir, são mostrados alguns

dados levantados por Wang e Liu (2021), referentes aos níveis de produção de resíduos de bauxita em alguns países do mundo.

Tabela 16 – Níveis de produção de bauxita ao redor do mundo

País	Referência	Produção de resíduos de bauxita (milhões de toneladas)
Arábia Saudita	Wang e Liu (2021)	2,52
Austrália	Wang e Liu (2021)	28,00
Brasil	Lima <i>et al.</i> (2017)	10,60
Canadá	Wang e Liu (2021)	2,10
China	Zeng <i>et al.</i> (2020)	96,00
Estados Unidos	Wang e Liu (2021)	2,24
Grécia	Sutar <i>et al.</i> (2014)	0,70
Índia	Vijaya <i>et al.</i> (2018)	10,00
Jamaica	Wang e Liu (2021)	2,94
Rússia	Wang e Liu (2021)	3,78

Fonte: Adaptado de WANG; LIU, 2021.

Com isso, Wang e Liu (2021) ressaltam que, a cada ano que passa, os resíduos de bauxita se tornam um passivo ambiental cada vez mais complexo de lidar por parte das empresas operadoras de refinarias de alumina, uma vez que à medida que os níveis de geração desse resíduo aumentam, aumenta a necessidade de construção de mais áreas de deposição de resíduos de bauxita, o que é um processo caro e custoso.

Segundo a ABAL (2017) isso se justifica pelo fato de que para que seja feito o licenciamento ambiental de uma ADRB, são necessários vários estudos de impactos ambientais e o pagamento de várias taxas aos órgãos licenciadores competentes, a serem feitos nas diferentes fases do processo de licenciamento ambiental, que envolvem a obtenção dos seguintes tipos de licença ambiental.

- Licença Prévia (LP);

- Licença de Instalação (LI);
- Licença de Operação (LO).

Além disso, de acordo com a ABAL (2017), durante o processo de licenciamento ambiental de uma determinada ADRB, pode se fazer necessária a realização de consultas aos seguintes órgãos do Governo Federal, nas seguintes circunstâncias.

- Instituto Chico Mendes de Biodiversidade (ICMBio), quando houver impacto ambiental potencial a Unidades de Conservação;
- Fundação Nacional do Índio (FUNAI), quando existir impacto potencial a comunidades indígenas, em terras demarcadas ou não;
- Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), quando o projeto possui potencial de impactar o patrimônio cultural nacional (bens materiais ou imateriais);
- Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), nos casos em que os projetos possuem potencial de afetar áreas envolvidas na reforma agrária, como assentamentos.

Com isso, é correto afirmar que o processo de licenciamento ambiental de novas áreas de deposição de resíduos de bauxita é complexo e pode se tornar extremamente burocrático, fazendo assim, com que seja necessário evitar o quanto possível a construção de novas ADRB para abrigar quantidades maiores de resíduos de bauxita.

Nesse sentido, o reaproveitamento de resíduos de bauxita se torna cada vez mais necessário para a redução dos custos e dos impactos ambientais provocados pelo armazenamento desse resíduo. Power *et al.* (2011), Xue *et al.* (2015) e Miura (2016) apontam que além de utilizar cada vez mais os resíduos em atividades de pesquisa, várias empresas têm utilizado técnicas de reflorestamento das ADRB, com o objetivo de devolvê-las à natureza com mais facilidade, sendo estas técnicas baseadas na neutralização da camada superior dos resíduos de bauxita, de modo a permitir um crescimento saudável das plantas e um aprofundamento da cada vez maior de suas raízes no solo de resíduos de bauxita.

Além disso, a preocupação cada vez maior das lideranças com questões ambientais, que teve como marco inicial a fundação do Clube de Roma em 1968, pode ser considerado como um fator de impulso crucial para o aumento da realização de pesquisas voltadas para o reaproveitamento de RB, a partir do final da década de 1960.

De acordo com o próprio Clube de Roma (2021), a organização era, inicialmente, um grupo composto por pessoas de diferentes profissões ramos e países, que era voltado para a discussão de questões ambientais e, foi o grupo responsável pela realização da I Conferência Mundial sobre o Meio Ambiente, em Estocolmo, no ano de 1972, marcada pela publicação do Relatório Meadows, publicação feita por membros da própria entidade e que foi intitulada “Os Limites do Crescimento”.

Desde então, várias ONGs como o Clube de Roma tem sido fundadas com o objetivo de discutir assuntos sociais e ambientais importantes para a humanidade, tendo contribuído como forças motrizes para o aumento da preocupação com causas ambientais, nas décadas finais do século XX e no século XXI, e conseqüentemente, como forças de incentivo para o aumento da realização de pesquisas com resíduos de bauxita, uma vez que com tais pesquisas demonstrando novas formas de reaproveitamento da lama vermelha, as empresas interessadas podem tentar adotar, em escala industrial, os processos desenvolvidos por essas pesquisas e, assim, diminuir a quantidade de RB depositada nas ADRB.

Isso, em consequência, permite que a empresa melhore a sua imagem, uma vez que estará adotando práticas sustentáveis e ecologicamente mais corretas para lidar com a questão dos resíduos de bauxita, fazendo com que a empresa que adote essas práticas se destaque em relação às demais e ganhe uma maior e melhor visibilidade no mercado.

Além disso, o reaproveitamento da lama vermelha em processos de sorção, para fins de remediação ambiental é algo muito positivo, uma vez que além de utilizar quantidades de LV que seriam estocadas em ADRB, para se fazer os sorventes, águas residuárias e solos contaminados poderão ser tratados e remediados quimicamente por meio de processos de sorção que tenham a lama vermelha como sorvente, o que se aplicado para fins de remediação ambiental do ambiente ao redor de uma refinaria de alumina, poderá melhorar a qualidade de vida tanto dos funcionários da empresa operadora da refinaria, quanto das comunidades no entorno.

10.2 IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA

Primeiramente, é correto afirmar que a importância socioeconômica do reaproveitamento de resíduos de bauxita está bastante ligada à pesquisa e ao desenvolvimento de processos voltados para a recuperação de elementos terras raras e outros metais valiosos,

uma vez que além de os resíduos de bauxita serem utilizados nessas pesquisas e novos processos, como fonte de produtos maior valor agregado, os processos desenvolvidos, caso transpostos para a escala industrial com sucesso, poderão se tornar fontes de empregos e renda para várias pessoas das comunidades locais e, conseqüentemente, melhorando o padrão de vida e os indicadores socioeconômicos dessas comunidades.

A recuperação de elementos terras raras da lama vermelha é uma excelente fonte para que um determinado país produtor de grandes quantidades de alumina, uma vez que a recuperação destes elementos dos RB gerados durante o refino da bauxita permitem com que haja uma produção local de óxidos de elementos terras raras, o que segundo Bardano e Gomes (2015) pode ajudar o Brasil a não depender tanto da China para a aquisição desses elementos, além de ajudar o Brasil e vários outros países a driblarem quaisquer restrições que o governo chinês pode vir a impor ao comércio internacional desses elementos, haja visto que, atualmente, a China responde por mais da metade da produção mundial de ETR.

Em relação a essa questão, um paralelo pode ser traçado com as restrições ao comércio global de bauxita impostos por diversos países durante a Primeira Guerra Mundial, para fins de garantir a produção de materiais bélicos à base de alumínio nos países envolvidos no conflito. Conforme relatado por Tilley *et al.* (1927), antes do início da Primeira Guerra Mundial, o fornecimento mundial de bauxita era bastante facilitado, com uma ampla gama de bauxitas de diferentes origens disponíveis no mercado.

Tilley *et al.* (1927) destacam que, durante a Primeira Guerra Mundial, várias restrições ao comércio internacional de bauxita foram impostas pelos países produtores envolvidos no conflito, o que diminuiu bastante as trocas comerciais desse minério ao redor do mundo.

Dessa forma, é correto afirmar que o reaproveitamento de resíduos de bauxita, para extração de elementos terras raras contidos nos mesmos, pode ser considerado como uma salvaguarda contra quaisquer restrições, ou até mesmo, interrupções ao comércio internacional desses elementos impostas pela China, que podem vir a ocorrer no caso do país asiático se envolver em algum grande conflito ou vir a aplicar sanções comerciais por conta de tensões políticas.

A extração de elementos terras raras e outros metais valiosos encontra-se principalmente no escândio. Segundo Borra *et al.* (2016), o escândio é o elemento mais valioso dentro de todos os ETR presentes nos RB. Binnemans *et al.* (2015) destacam que o Sc representa mais de 95% do valor econômico de todos os elementos terras raras encontrados nos

resíduos de bauxita. Atualmente, o preço do óxido de escândio puro é de US\$5732,46 por kg (ISE, 2021).

Além disso, Narayanan *et al.* (2021) realizaram uma análise econômica da extração de escândio da lama vermelha e determinaram que é possível se realizar em escala industrial e, de forma economicamente sustentável, a extração de Sc de RB, dado que os resultados da análise econômica feita por Narayanan *et al.* (2021), baseada no Método de Monte Carlo, para um processo industrial de extração de Sc_2O_3 da LV, completamente desenvolvido, indicam um valor presente líquido (VPL) sempre positivo.

Outro elemento terra rara de valor considerável, encontrado nos resíduos de bauxita é o urânio. Mesmo que possua um valor de mercado baixo, comparado ao valor de mercado do escândio, o urânio possui importante aplicação como material combustível para a geração de energia nuclear. Atualmente, o valor de mercado do urânio é de US\$33,28 por lb (EIA, 2021).

Um metal de valor agregado bastante importante no âmbito da extração de elementos valiosos da lama vermelha é o ferro metálico. Conforme demonstrado por Lazou *et al.* (2021), sua versão melhorada do Processo Pedersen rendeu uma fase caracterizada por ferro metálico rico em cromo, titânio e vanádio, que pode ser utilizado para a fabricação de aços inoxidáveis de alta qualidade.

Ademais, os materiais compósitos à base de lama vermelha possuem propriedades muito promissoras que podem possibilitar suas aplicações em diversas áreas, principalmente, na construção civil e nas indústrias automotiva e química, por conta de suas propriedades mecânicas melhores que as dos materiais constituintes de suas matrizes.

Os estudos destacados neste trabalho, também, destacam que a lama vermelha possui um bom potencial de uso na indústria química, como catalisador alternativo, de modo a se ter um catalisador que melhore a eficiência energética e o rendimento de processos químicos industriais já existentes.

Devido ao fato de que os ganhos de eficiência energética e rendimento reacionais, proporcionados pelo uso da lama vermelha como catalisador alternativo, podem proporcionar ganhos financeiros, é correto afirmar que há um bom potencial para adoção em escala industrial de novos processos químicos que tenham a lama vermelha catalisador.

Ademais, as pesquisas e o desenvolvimento de novos processos industriais voltados para o reaproveitamento de resíduos de bauxita podem ser vistos como uma forma de

valorização da Ciência local, gerando assim mais retorno financeiro para o Estado, em termos de arrecadação de imposto, que poderá ter uma boa parte revertida para mais investimentos em Educação e programas de fomento e amparo à Ciência.

10.3 INCENTIVO À CRIAÇÃO DE INDÚSTRIAS PARALELAS

Lazou *et al.* (2021), ao desenvolverem uma versão melhorada do Processo Pedersen, com base em extração eletroquímica do ferro metálico da lama vermelha abriram um amplo leque de possibilidades de criação de indústrias paralelas, com base na versão desse processo químico, proposta pelos mesmos.

Ao tornar possível a produção de ferro metálico rico em cromo, titânio e vanádio, Lazou *et al.* (2021) abriram a possibilidade de refinarias de bauxita operarem de forma integrada às suas plantas de refino de bauxita, plantas de produção de aço inoxidável, que por sua composição, poderá ter maior valor agregado no mercado de aços.

Além disso, há a questão da valorização da lama vermelha, uma vez que poderá ser utilizada como matéria-prima para o Processo Pedersen, com até mesmo resíduos de mineração de bauxita e bauxitas não-metalúrgicas podendo ser utilizados como matérias-primas desse processo.

Como o Processo Pedersen também permite a extração de alumina da escória produzida pelo processo, através de lixiviação alcalina, a refinaria poderá operar uma planta de lixiviação alcalina da escória gerada pelo Processo Pedersen, de modo a promover maiores níveis de produção de alumina em todo o complexo fabril.

Outro processo químico bastante promissor a nível industrial é o processo de hidrogenação do CO₂ elaborado por Russkikh *et al.* (2020), que tem a lama vermelha, ativada por hidróxido e carbonato de potássio, como catalisador. Nas condições ideais de reação, 43% de todo o CO₂ alimentado foi convertido em etileno, propileno, e 1-buteno, que são produtos que possuem várias aplicações nas indústrias química, petroquímica, alimentícia e, até mesmo, de semicondutores, podendo dessa forma, serem considerados como produtos de alto valor agregado.

Dessa forma, é correto afirmar que quando forem desenvolvidas pesquisas que melhorem ainda mais as condições de hidrogenação do CO₂ propostas por Russkikh *et al.* (2020), de modo a permitir maiores conversões de CO₂ em olefinas, o processo químico

desenvolvido por Russkikh *et al.* (2020) poderá, sem dúvidas, encontrar aplicação em escala industrial, uma vez que assim, já se terá um processo reacional mais eficiente, tanto em termos de energia, quanto em termos de conversão e rendimento.

O mesmo pode ser dito em relação ao processo de extração de urânio da lama vermelha, desenvolvido por Gu e Wang (2013), uma vez que ao ser melhorado de forma a permitir uma extração maior de urânio, diminuindo também, os níveis de contaminação do U extraído por parte de impurezas provenientes dos RB, haverá um incentivo maior para a adoção escala industrial do processo, com o processo permitindo quantidades maiores de urânio de maior grau de pureza, que poderá encontrar aplicações como geração de energia nuclear.

Por conta dos resultados demonstrados, os processos de extração de elementos terras raras da lama vermelha, desenvolvidos por Wang *et al.* (2013), Botelho Júnior *et al.* (2021) e Basturkcü (2021) são os que possuem, no momento, maior potencial de transposição para a escala industriais, haja visto que são processos industriais que possuem altas eficiências extrativas de ETR da lama vermelha, podendo antes disso, terem seus comportamentos em escala industrial previstos de forma mais econômica, por meio de simulações computacionais. Além disso, a favor do processo de extração de ETR da LV, desenvolvido por Wang *et al.* (2013), conta o fato de que o escândio representa mais de 95% do valor de mercado dos elementos terras raras presentes nos resíduos de bauxita.

11 CONCLUSÃO

Conforme abordado neste trabalho, as características físico-químicas dos resíduos de bauxita podem variar de acordo com a mineralogia da bauxita de origem e, também, de acordo com a refinaria de bauxita onde o resíduo foi gerado, o que se deve, particularmente, às condições de operação do processo de refino de bauxita em cada refinaria.

Além disso, um importante parâmetro físico-químico, que define a forma de disposição dos resíduos de bauxita, é o teor de sólidos, podendo as formas de disposição desses resíduos irem desde a disposição em alto mar até à disposição a seco. Esta última forma de disposição de RB é a que pode ser considerada a mais ecologicamente correta, uma vez que ao serem dispostos com o menor grau de umidade possível, os resíduos de bauxita possuem um menor potencial de se infiltrarem no solo e contaminarem lençóis freáticos que podem ser fonte

de água potável para as comunidades do entorno da refinaria de bauxita. Ademais, a disposição a seco também contribui para a redução de acidentes ocasionados pelo contato de seres humanos e animais com licor cáustico, devido ao teor de umidade reduzido dos RB dispostos dessa forma.

Neste trabalho, também, foi visto que os resíduos de bauxita podem ser gerados em duas etapas da cadeia de produção do alumínio primário, sendo estas a mineração e o refino. No entanto, independente de terem sido gerados durante a mineração ou o refino, os RB podem ser utilizados como matéria-prima para diversos processos químicos, inclusive alguns que possuem um grande potencial de aplicação industrial, como o Processo Pedersen melhorado por Lazou *et al.* (2021).

Também, é correto afirmar que não são recentes as primeiras pesquisas voltadas para o reaproveitamento dos resíduos de bauxita, especialmente, as que objetivam a extração de metais valiosos e, posteriormente, elementos terras raras, com estas pesquisas remontando aos primeiros anos da década de 1920. Atualmente, o principal foco da extração de materiais valiosos da lama vermelha está na extração de ferro metálico e de elementos terras raras, com destaque para o escândio, uma vez que este ETR concentra mais de 95% do valor econômico de todos os elementos terras raras presentes nos resíduos de bauxita, conforme apontado por Binnemans *et al.* (2015).

Recentemente, vários estudos com resultados promissores têm sido feitos, de modo a maximizar as eficiências de extração de elementos valiosos dos resíduos de bauxita, de modo que vários desses processos extrativos possuem potencial de aplicação em escala industrial, especialmente os desenvolvidos por Basturkcu (2021), Botelho Júnior *et al.* (2021) e Lazou *et al.* (2021). Além disso, vale destacar que a utilização da lama vermelha como matéria-prima para a elaboração de catalisadores alternativos, que ao longo dos anos, vêm se tornando cada vez mais eficientes, fazendo assim, com que vários processos reacionais catalíticos, que têm resíduos de bauxita como catalisadores, possuam cada vez mais potencial de aplicação industrial, em especial os processos catalíticos voltados para a produção de biodiesel e para a produção de compostos orgânicos de alto valor agregado, a partir da hidrogenação de CO₂, como o processo desenvolvido por Russkikh *et al.* (2020).

O uso da lama vermelha em sistemas de sorção, especialmente, para fins de remediação ambiental, também, é uma aplicação bastante promissora desse resíduo na indústria química, visto que os vários estudos analisados neste trabalho demonstram que os resíduos de

bauxita possuem um bom potencial de remoção de uma ampla gama de contaminantes químicos de águas residuárias e solos, o que pode contribuir para a melhoria da qualidade de vida das comunidades ao redor da refinaria que utilizar a lama vermelha como sorvente para fins de remediação ambiental.

Dessa forma, conclui-se que o uso da lama vermelha como matéria-prima em processos químicos não é algo recente, porém, é bastante promissor quando se trata do uso desse resíduo como matéria-prima em processos químicos que se dão a nível industrial, uma vez que, atualmente, vários estudos recentes atestam a possibilidade de aplicação, a nível industrial, dos vários processos químicos desenvolvidos, que possuem LV como matéria-prima, dadas as altas eficiências obtidas para esses processos.

Por fim, a aplicação da lama vermelha em processos químicos industriais, também, é bastante promissora dos pontos-de-vista ambiental e social, visto que ao aumentar a taxa de reaproveitamento da lama vermelha, diminui-se os passivos ambientais da empresa operadora da refinaria, além de serem reduzidos tempo e dinheiro gastos com procedimentos burocráticos referentes ao licenciamento ambiental de novas áreas de disposição de resíduos de bauxita, além de permitir uma geração maior de empregos na refinaria, ao se ter processos integrados para a extração de materiais valiosos dos resíduos de bauxita na mesma planta onde se faz o refino do minério.

Logo, é correto afirmar que foram cumpridos os objetivos gerais e específicos propostos para este trabalho, visto que foi estudada a partir de uma ampla e criteriosa revisão da literatura as aplicações dos resíduos provenientes do refino de bauxita em áreas afins à Engenharia Química, tendo sido, também, realizada uma revisão bibliográfica sobre os processos de refino de bauxita e suas influências na geração de resíduos de bauxita produzidos na rota de extração da alumina. Além disso, também, foram descritas diversas aplicações dos resíduos de bauxita em processos de sorção, sistemas catalíticos e extração de ETR e outros metais valiosos presentes nesses resíduos, finalizando com a avaliação dos principais impactos econômicos e ambientais das possíveis aplicações para os resíduos provenientes do refino da bauxita.

Dessa forma, conclui-se que este trabalho pode ser um trabalho promissor no âmbito das pesquisas relacionadas ao reaproveitamento de resíduos, dado que reúne em um só grande trabalho de revisão bibliográfica vários dados e várias informações a respeito de propriedades

dos resíduos de bauxita e, de estudos relacionados às suas mais diversas aplicações, podendo este, até mesmo, vir a se tornar um trabalho de referência internacional na área.

12 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados dos estudos abordados neste trabalho, além das próprias conclusões deste, é correto afirmar que, nesse momento, existem várias sugestões de trabalhos futuros a serem feitos, de modo a atestar ainda mais a viabilidade de aplicação, em escala industrial, dos vários processos químicos com alto potencial de transposição para a escala industrial, abordados neste trabalho. As sugestões de trabalhos a serem realizados para este fim incluem, mas não estão limitadas a:

- Realização de simulações computacionais para fins de previsão e estudo do comportamento em escala industrial do processo de extração de Sc_2O_3 da lama vermelha, desenvolvido por Wang *et al.* (2013);
- Estudo das condições de extração de urânio e tório da lama vermelha, de modo a permitir uma compreensão maior das variáveis que influenciam esse processo, visando uma eficiência de extração maior desses elementos terras raras da lama vermelha, em comparação com os resultados obtidos por Gu e Wang (2013);
- Estudo das variáveis que influenciam a reação de hidrogenação de CO_2 e sua catálise pela lama vermelha, de modo a permitir um aumento da conversão do gás em olefinas de alto valor agregado;
- Realização de estudos de análise de viabilidade econômica da aplicação em escala industrial dos processos de extração de materiais valiosos propostos por Lazou *et al.* (2021), Botelho Júnior *et al.* (2021) e Basturkcü (2021);
- Realização de simulações computacionais para fins de previsão e estudo do comportamento em escala industrial dos processos de extração de materiais valiosos da lama vermelha, propostos por Lazou *et al.* (2021) e Basturkcü (2021);
- Uso da lama vermelha para o desenvolvimento de novos materiais compósitos baseados em diferentes matrizes, incluindo matrizes vítreas ou amorfas, acompanhado de uma avaliação das principais propriedades desses materiais.

REFERÊNCIAS

ABBASI, S. M. *et al.* Synthesis, processing, characterization, and applications of red mud/carbon nanotube composites. **Ceramics International**, v. 42, n. 15, 2016, p. 16738-16743. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.146>.

ABEL, J. S. *et al.* Sedimentation in flocculating colloidal suspensions. **Journal of Materials Research**, Cambridge, UK, v. 9, n. 2, 1994, p. 451-461. DOI <https://doi.org/10.1557/JMR.1994.0451>.

AKINCI, A.; AKBULUT, H.; YILMAZ, F. Mechanical Properties of Cost-Effective Polypropylene Composites Filled with Red-Mud Particles. **Polymers and Polymer Composites**, [s. l.], v. 16, n. 7, 2008, p. 439-446. DOI <https://doi.org/10.1177%2F096739110801600705>.

ALAM, S.; DAS, B. K.; DAS, S. K. Dispersion and Sedimentation Characteristics of Red Mud. **Journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste**, Reston, Virginia, USA, v. 22, n. 4, 2018. DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000420](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000420).

ALAM, S.; DAS, S. K.; RAO, B. H. Characterization of coarse fraction of red mud as a civil engineering construction material. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 168, 2017, p. 679-691. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.210>.

ALTUNDOĞAN, H. S. *et al.* Arsenic adsorption from aqueous solutions by activated red mud. **Waste Management**, [s. l.], v. 22, n. 3, 2002, p. 357-363. DOI [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(01\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00041-1).

ÁLVAREZ, J. *et al.* A new method for enhancing the performance of red mud as a hydrogenation catalyst. **Applied Catalysis A: General**, [s. l.], v. 180, n. 1-2, 1999, p. 399-409. DOI [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(98\)00373-1](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(98)00373-1).

AMADEU, M. S. U. dos S. *et al.* **Manual de normalização de trabalhos científicos**: de acordo com as normas da ABNT. 2. ed. Curitiba: Editora UFPR, 2017. ISBN 978-85-8480-002-5. Disponível em: <http://www.palotina.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2016/04/Manual-de-Normalizacao-de-Docmentos-Cientificos-2017.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2021

ANTUNES, M. L. P. *et al.* Bauxita e seu resíduo, caracterização e estudo por microscopia eletrônica. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 56.; CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CERÂMICA, 1.; BRAZILIAN SYMPOSIUM ON GLASS AND RELATED MATERIALS, 9., 2012, Curitiba, PR. [Anais]. São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2012. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/079/46079218.pdf. Acesso em: 11 ago. 2021.*

ANTUNES, M. L. P. *et al.* Caracterização da lama vermelha, resíduo da bauxita, ativada por tratamento térmico. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 54., 2010, Foz do Iguaçu, PR. [Anais]. São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2010. Disponível em: https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/54/13-027.pdf. Acesso em: 16 jul. 2021.*

APAK, R.; GÜÇLÜ, K.; TURGUT, M. H. Modelling of Copper (II), Cadmium (II), and Lead (II) Adsorption on Red Mud. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 203, n. 1, 1998, p. 122-130. DOI <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5457>.

ARENARE, D. de S. **Caracterização de amostras de bauxita visando a aplicação de métodos de concentração gravítica**. 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-8DRK92/1/1259m.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2021.

ARIAS, M. *et al.* Adsorption of Methylene Blue by Red Mud, An Oxide-Rich Byproduct of Bauxite Refining. *In: BERTHELIN, J. et al. Effect of Mineral-Organic-Microorganism Interactions on Soil and Freshwater Environments*. [s. l.]: Springer Nature, 1999. cap. 39. p. 361-365. ISBN 978-1-4615-4683-2. DOI https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4683-2_39.

ARORA, K. R. **Soil Mechanics and Foundation Engineering**. 7th ed. Standard Publishers Distributors: New Delhi, India, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16853**: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Alumínio: Cadeia Primária. **abal.org.br**, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>. Acesso em: 21 jun. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Bauxita no Brasil: Mineração Responsável e Competitividade**. São Paulo: ABAL, 2017. Disponível em: http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf. Acesso em: 7 set. 2021.

ATASOY, A. An investigation on characterization and thermal analysis of the Aughinish red mud. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [s. l.], v. 81, n. 2, 2005, p. 357-361. DOI <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0792-5>.

BABU, K. S. **Characteristics study of stabilized red mud waste as a resource material for pavement**. 2018. Dissertação de Mestrado – School of Infrastructure, Indian Institute of Technology, Bhubaneswar, Índia, 2018.

BAI, Y.; MILESTONE, N. B.; YANG, C. Sodium Sulphate Activated GGBS/PFA and Its Potential as a Nuclear Waste Immobilization Matrix. *In*: SYMPOSIUM ON SCIENTIFIC BASIS FOR NUCLEAR WASTE MANAGEMENT, 29., 2006. **Proceedings [...]**. v. 932. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006. p. 38.1. DOI <https://doi.org/10.1557/PROC-932-38.1>.

BALOMENOS, E. *et al.* Bauxite Residue Handling Practice and Valorisation Research in Aluminium of Greece. *In*: INTERNATIONAL BAUXITE RESIDUE VALORISATION AND BEST PRACTICES CONFERENCE, 2., 2018, Atenas, Grécia. **Proceedings [...]**. Atenas, Grécia: [s. n.], 2018. p. 29-37. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Efthymios-Balomenos/publication/331431082_Bauxite_Residue_Handling_Practice_and_Valorisation_Research_in_Aluminium_of_Greece/links/5c78e3b0a6fdcc4715a40089/Bauxite-Residue-Handling-Practice-and-Valorisation-Research-in-Aluminium-of-Greece.pdf. Acesso em: 28 set. 2021.

BANVOELGYI, G.; HUAN, T. M.; DIRECTOR, F. G. De-watering, disposal and utilization of red mud: state of the art and emerging technologies. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF ICSOBA, 18., 2010, Zhengzhou, China. **Proceedings [...]**. Quebec, Canada: ICSOBA, 2010. p. 431-443.

BARBOSA, J. T. L. **Caracterização de compósitos poliméricos feitos com resíduos pós-consumo (poliestireno de alto impacto) e industriais (lama vermelha e fibra de vidro/resina epóxi)**. 2019. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, SP, 2019. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/180874/barbosa_jtl_me_bauru_sub.pdf?sequence=5. Acesso em: 28 ago. 2021.

BARCA, C. *et al.* Phosphorus removal from wastewater by carbonated bauxite residue under aerobic and anoxic conditions. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], v. 39, 2021, p. 101757. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101757>.

BARDANO, B. M. M.; GOMES, R. de C. **Potencial de Aproveitamento de Fontes Secundárias para Terras-Raras: Resíduos industriais**. Brasília: Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 2015. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1834/1/SED-86%20%281%29.pdf>. Acesso em: 4 set. 2021.

BARROW, N. J. Possibility of using caustic residue from bauxite for improving the chemical and physical properties of sandy soils. **Australian Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 33, n. 2, 1982, p. 275-285. DOI <https://doi.org/10.1071/AR9820275>.

BASTURKCU, H. Extraction of lanthanum and yttrium from red mud following elimination of ionic impurities. **Separation Science and Technology**, [s. l.], v. 56, n. 13, 2021, p. 2243-2252. DOI <https://doi.org/10.1080/01496395.2020.1813177>.

BEDIN, J. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. 2010. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/26869/000761673.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 jul. 2021.

BEDIN, J. **Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita**. 2006. 256 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/10404/000597884.pdf?sequence=1>. Acesso em: 24 jul. 2021.

BELVISO, C. *et al.* Synthesis of composite zeolite-layered double hydroxides using ultrasonic neutralized red mud. **Microporous and Mesoporous Materials**, [s. l.], v. 299, 2020, p. 110108. DOI <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110108>.

BELVISO, C. *et al.* Synthesis of magnetic zeolite at low temperature using a waste material mixture: Fly ash and red mud. **Microporous and Mesoporous Materials**, [s. l.], v. 202, 2015, p. 208-216. DOI <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.09.059>.

BENTO, N. I. Composites based on PET and red mud residues as catalyst for organic removal from water. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 314, 2016, p. 304-311. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.066>.

BEZERRA, W. S.; MACÊCO, E. N.; SOUZA, J. A. D. S. Utilização da lama vermelha proveniente do processo produtivo da alumina como filler Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). *In*: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO (RAPv), 40., 2010, Rio de Janeiro. [Anais]. Rio de Janeiro: [s. n.], 2010.

BHAT, A. H.; BHANTIA, A. K. Improvement of the Red Mud Polymer-Matrix Composites by Organophilization of Red Mud. **Advanced Materials Research**, [s. l.], v. 29-30, 2007, p. 333-336. DOI <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.29-30.333>.

BHAT, A. H.; BHANTIA, A. K. Preparation and characterization of poly (vinyl alcohol)-modified red mud composite materials. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 103, n. 1, 2007, p. 238-243. DOI <https://doi.org/10.1002/app.25180>.

BHUMIJ, R. K. **Compaction characteristics of red mud and pond ash mix as filling and embankment material**. 2015. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Departamento de Engenharia Civil, National Institute of Technology, Rourkela, India, 2015. Disponível em: http://ethesis.nitrkl.ac.in/7380/1/2015_Compaction_Bhumj.pdf. Acesso em: 12 jul. 2021.

BINNEMANS, K. *et al.* Towards zero-waste valorisation of rare-earth containing industrial process residues: a critical review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 99, 2015, p. 17-38. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.089>.

BISWAS, S.; SATAPATHY, A. A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo-epoxy and glass-epoxy composites. **Materials & Design**, [s. l.], v. 31, n. 4, 2010, p. 1752-1767. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.021>.

BISWAS, S.; SATAPATHY, A. Tribo-performance analysis of red mud filled glass-epoxy composites using Taguchi experimental design. **Materials & Design**, [s. l.], v. 30, n. 8, 2009, p. 2841-2853. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.018>.

BORRA, C. R. *et al.* Recovery of Rare Earths and Other Valuable Metals from Bauxite Residue (Red Mud): A Review. **Journal of Sustainable Metallurgy**, [s. l.], v. 2, 2016, p. 365-386. DOI <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0068-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40831-016-0068-2.pdf>. Acesso em: 3 set. 2021.

BOTELHO JUNIOR, A. B.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. The use of computational thermodynamic for yttrium recovery from rare earth elements-bearing residue. **Journal of Rare Earths**, [s. l.], v. 39, n. 2, 2021, p. 201-207. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.02.019>.

BOTTENTUIT JÚNIOR, J. B. **Como elaborar um projeto de pesquisa?:** Concepção e Estruturação. 2019. 37 f. Notas de aula.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispões sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília. **Diário Oficial da União**, 12 fev. 1998. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm. Acesso em: 5 set. 2021.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 5 set. 2021.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **Tabela de Áreas do Conhecimento**. Brasília: CNPq, [201-?]. Disponível em: <http://lattes.cnpq.br/documents/11871/24930/TabeladeAreasdoConhecimento.pdf/d192ff6b-3e0a-4074-a74d-c280521bd5f7>. Acesso em: 2 jul. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro**. v. 35. Brasília: DNPM, 2010. ISSN 0100-9303. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt->

br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/anuario-mineral-brasileiro-2010. Acesso em: 24 jun. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 452, de 02 de julho de 2012. Dispõe sobre os procedimentos de controle da importação de resíduos, conforme as normas adotadas pela Convenção da Basiléia sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2 jun. 2012. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=656. Acesso em: 5 set. 2021.

BRUNAUER, S.; EMMETT; P. H.; TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. **Journal of the American Chemical Society**, [s. l.], v. 60, n. 2, 1938, p. 309-319. DOI <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>. Disponível em: <http://www.quimica.ufpb.br/arymaia/BET%201938.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2021.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. ISBN 978-8521637288.

CAMPBELL, C. D. **Titanium: A Summary of the Literature**. 1939. 36 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica) – University of Michigan, Detroit, Michigan, USA, 1939. Disponível em: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/101213/39015003285858.pdf?sequence=2>. Acesso em 2 set. 2021.

CARTER, C. M. *et al.* Characterization of Untreated and Neutralized Bauxite Residue for Improved Waste Management. **Environmental Engineering Science**, [s. l.], v. 25, n. 4, 2008, p. 475-488. DOI <https://doi.org/10.1089/ees.2006.0234>.

CARVALHO, A. P. de L. F. de. **Redes Neurais Artificiais**. São Carlos, SP: Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em: <https://sites.icmc.usp.br/andre/research/neural/>. Acesso em: 15 ago. 2021.

CASTRO, M. M. de *et al.* A New Concept of Dry Disposal of Alunorte's Bauxite Residue. In: INTERNATIONAL ALUMINA QUALITY WORKSHOP, 9., 2012, Perth, WA. **Proceedings [...]**. Perth, WA: [s. n.], 2012. Disponível em: https://www.aqw.com.au/papers.raw?task=callelement&item_id=139&element=5b3ad36a-1a89-48ba-98f7-2f27a877a55d&method=download. Acesso em: 7 jul. 2021.

CHENG, Y. *et al.* Feasible low-cost conversion of red mud into magnetically separated and recycled hybrid SrFe₁₂O₁₉@NaP1 zeolite as a novel wastewater adsorbent. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 417, 2021, p. 128090. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128090>.

CHOE, G.; KANG, S.; KANG, H. Characterization of Slag Cement Mortar Containing Nonthermally Treated Red Mud. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 9, n. 12, 2019, p. 2510. DOI <https://doi.org/10.3390/app9122510>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/12/2510/pdf>. Acesso em: 11 ago. 2021.

CLARK, M. W.; JOHNSTON, M.; REICHEL-T-BRUSHETT, A. J. Comparison of several different neutralisations to a bauxite refinery residue: potential effectiveness environmental ameliorants. **Applied Geochemistry**, [s. l.], v. 56, 2015, p. 1-10. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.015>.

CLUB OF ROME. About the Club of Rome. **clubofrome.org**, Roma, Itália, 2021. Disponível em: <https://www.clubofrome.org/about-us/>. Acesso em: 7 set. 2021.

COLLINS, F. *et al.* A critical review of waste resources, synthesis and applications for Zeolite LTA. **Microporous and Mesoporous Materials**, [s. l.], v. 291, 2020, p. 109667. DOI <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109667>.

CONSTANTINO, V. R. L. *et al.* Preparação de compostos de alumínio a partir de bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**, [s. l.], v. 25, n. 3, 2002, p. 490-498.

COSTENARO, R. *et al.* Uma análise das determinações de área superficial de nitrogênio sobre sílicas e modelagem da interação entre estes compostos. *In*: CONGRESSO INTERNO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, 18., 2010, Campinas, SP. [Anais]. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 2010. Disponível em: <https://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xviii-congresso/paineis/084589.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2021.

COURTNEY, R.; MULLEN, G.; HARRINGTON, T. An evaluation of revegetation success on bauxite residue. **Restoration Ecology**, [s. l.], v. 17, n. 3, 2009, p. 350-358. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00375.x>.

CRUZ, T. J. T. **Síntese de zeólita LTA usando resíduos de cinzas leves de carvão**. 2020. 88 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade

Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/30697/1/Sintesezeolita_Cruz_2020.pdf.

Acesso em: 13 ago. 2021.

CUSACK, P. B. *et al.* Enhancement of bauxite residue as a low-cost adsorbent for phosphorus in aqueous solution, using seawater and gypsum treatments. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 179, 2018, p. 217-224. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.092>.

CUSSLER, E. L. **Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems**. 3rd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.

ÇORUH, S.; GEYIKÇI, F.; ERGUN, O. N. Adsorption of basic dye from wastewater using raw and activated red mud. **Environmental Technology**, [s. l.], v. 32, n. 11, 2011, p. 1183-1193. DOI <https://doi.org/10.1080/09593330.2010.529946>.

DANI, N. *et al.* Nordstranite in Bauxite Derived from Phonolite, Lages, Santa Catarina, Brazil. **Clays and Clay Minerals**, [s. l.], v. 49, 2001, p. 216-226. DOI <https://doi.org/10.1346/CCMN.2001.0490304>.

DANIEL, D. E. **Geotechnical Practice for Waste Disposal**. Londres: Chapman and Hall, 1993.

DAS, S. K.; ROUT, S.; ALAM, S. Characterization of red mud as a subgrade construction material. *In*: CONFERENCE OF THE TRANSPORTATION RESEARCH GROUP OF INDIA (CTRG), 3., 2015, Kolkata. **[Proceedings]**. [s. l.]: [s. n.], 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Shamshad-Alam-9/publication/305141860_Characterization_of_Red_Mud_as_a_Subgrade_Construction_Material/links/5783585008ae5f367d3b75cd/Characterization-of-Red-Mud-as-a-Subgrade-Construction-Material.pdf. Acesso em: 12 jul. 2021.

DASH, A. K.; THATOI, D. N.; SARANGI, M. K. Analysis of the mechanical characteristics of a red mud filled hybridized composite. **Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering**, [s. l.], 2010. DOI <https://doi.org/10.1109/FAME.2010.5714790>.

DEIHIMI, N.; IRANNAJAD, M.; REZAI, B. Characterization studies of red modification processes as adsorbent for enhancing ferricyanide removal. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 206, 2018, p. 266-275. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.037>.

DENNIS, W. H. **Metallurgy: 1863-1963**. Piscataway, New Jersey, USA: Routledge, 2010. ISBN 978- 0202363615.

DING, W. *et al.* A novel process for extraction of iron from a refractory red mud. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, [s. l.], v. 56, n. 6, 2020, p. 125-136. ISSN 1643-1049. DOI 10.37190/ppmp/127319. Disponível em: https://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-b8ba346c-b5ea-42df-a838-fafa66487398/c/125-136_vol_56_6.pdf. Acesso em: 6 out. 2021.

DOBRA, G. *et al.* Bauxite residue safety disposal and friendly environmental processing permanent care at Vimetco Alum SA Tulcea. In: BAUXITE RESIDUE VALORISATION AND BEST PRACTICES CONFERENCES, 2015, Leuven, Bélgica. [**Proceedings**]. Leuven, Bélgica: Red Mud Project, 2015. Disponível em: https://conference2015.redmud.org/wp-content/uploads/2015/10/P5_Leuven-Presentation-A-rev-6.pdf. Acesso em: 11 ago. 2021.

DONOGHUE, A. M.; FRISCH, N.; OLNEY, D. Bauxite Mining and Alumina Refining: Process Description and Occupational Health Risks. **Journal of Occupational and Environmental Medicine**, [s. l.], v. 56, n. 5S, 2014, p. S12-S17. DOI <https://dx.doi.org/10.1097%2FJOM.0000000000000001>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4131932/pdf/joem-56-s12.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2021.

DUNENS, O. M.; MACKENZIE, K. J.; HARRIS, A. T. Synthesis of multi-walled carbon nanotubes on ‘red mud’ catalysts. **Carbon**, [s. l.], v. 48, n. 8, 2010, p. 2375-2377. DOI <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.02.039>.

EAMSIRI, A. *et al.* Activated red mud as a catalyst for the hydrogenation of coals and of aromatic compounds. **Fuel**, [s. l.], v. 71, n. 4, 1992, p. 449-453. DOI [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(92\)90036-N](https://doi.org/10.1016/0016-2361(92)90036-N).

EID, J. G. **Estudo da aplicação da lama vermelha como catalisador na reação de craqueamento térmico catalítico de resíduos de caixas de gordura**. 2015. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/7712/1/Dissertacao_EstudoAplicacaoLama.pdf. Acesso em: 30 ago. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2021.

EVANS, K. The history, challenges, and new developments in the management and use of bauxite residue. **Journal of Sustainable Metallurgy**, [s. l.], v. 2, n. 4, 2016, p. 316-331. DOI <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0060-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40831-016-0060-x.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2021.

EVANS, K.; NORDHEIM, E.; TSESMELIS, K. Bauxite Residue Management. *In*: SUAREZ, C. E. (ed.) **Light Metals**. [S. l.]: Springer, 2012. cap. 11. p. 63-66. ISBN 978-3-319-48179-1. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_11.

FERREIRA, L. R. **Utilização do resíduo de bauxita como agregado miúdo para a produção de concreto**. 2019. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Coordenação do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019. Disponível em: <https://monografias.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/4457/1/Lucas%20Rodrigues%20Ferreira.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2021.

FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4. ed. Tradução Verônica Calado; Evaristo C. Biscaia Jr. Revisão Técnica Frederico W. Tavares. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

FONSECA, A. C. L. **Alumínio**. [Belo Horizonte]: UFMG: CODEMGE, 2018. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/wp-content/uploads/2018/10/Aluminio.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2021.

FORTIN, J.; KARAM, A. Effect of a commercial peat-moss shrimp wastes compost on pucinellia growth in red mud. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, [s. l.], v. 12, n. 3, 1998, p. 105-109. DOI <https://doi.org/10.1080/09208118908944032>.

FORTUNA, J. *et al.* Processo Bayer de obtenção de alumina como ferramenta para o ensino de conceitos de estequiometria. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 16., 2012, Salvador. [Anais]. Salvador, BA: ED/SBQ: UFBA: UESB: UESC: UNEB, 2012.

Disponível em:
<https://periodicos.ufba.br/index.php/anaiseneq2012/article/viewFile/7702/5643>. Acesso em:
 22 jun. 2021.

FULLER, R. D.; NELSON, E. D. P.; RICHARDSON, C. J. Reclamation of Red Mud (Bauxite Residues) Using Alkaline-Tolerant Grasses with Organic Amendments. **Journal of Environmental Quality**, [s. l.], v. 11, n. 3, 1982, p. 533-539. DOI <https://doi.org/10.2134/jeq1982.00472425001100030040x>.

FULLER, R. D.; RICHARDSON, C. J. Aluminate toxicity as a factor controlling plant growth in bauxite residue. **Environmental Toxicology and Chemistry**, [s. l.], v. 5, n. 10, 1986, p. 905-915. DOI <https://doi.org/10.1002/etc.5620051007>.

GAO, C. *et al.* Modified red mud catalyst for the selective catalytic reduction of nitrogen oxides: Impact mechanism of cerium precursors on surface physicochemical properties. **Chemosphere**, [s. l.], v. 257, 2020, p. 127215. DOI <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127215>.

GARAU, G. *et al.* Influence of red mud, zeolite and lime on heavy metal immobilization, culturable heterotrophic microbial populations and enzyme activities in a contaminated soil. **Geoderma**, [s. l.], v. 142, n. 1-2, 2007, p. 47-57. DOI <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.07.011>.

GARCIA, M. C. S. **Modificação do resíduo de bauxita gerado no processo Bayer por tratamento térmico**. 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-13062013-121328/publico/Diss_MartaGarcia.pdf. Acesso em: 13 jul. 2021.

GARCIA MARTÍNEZ, J.; PÉREZ-PARIENTE, J. **Materiales zeolíticos: Síntesis, propiedades y aplicaciones**. San Vicente, España: Publicaciones de la Universidad de Alicante, 2003.

GENÇ, H. *et al.* Adsorption of arsenate from water using neutralized red mud. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 264, n. 2, 2003, p. 327-334. DOI [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00447-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00447-8).

GENÇ-FUHRMAN, H.; TJELL, J. C. MCCONCHIE, D. Adsorption of Arsenic from Water Using Activated Neutralized Red Mud. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 38, n. 8, 2004, p. 2428-2434. DOI <https://doi.org/10.1021/es035207h>.

GENÇ-FUHRMAN, H.; TJELL, J. C. MCCONCHIE, D. Increasing the arsenate adsorption capacity of neutralized red mud (Bauxsol). **Journal of Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 271, n. 2, 2004, p. 313-320. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.10.011>.

GEYIKÇI, F. *et al.* Modelling of lead adsorption from industrial sludge leachate on red mud by using RSM and ANN. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 183, 2012, p. 53-59. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.019>.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017. ISBN 978-85-97-01292-7.

GÖK, A.; OMASTOVÁ, M.; PROKEŠ, J. Synthesis and characterization of red mud/polyaniline composites: Electrical properties and thermal stability. **European Polymer Journal**, [s. l.], v. 43, n. 6, 2007, p. 2471-2480. DOI <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.03.005>.

GORDON, J. N.; PINNOCK, W. R.; MOORE, M. M. A preliminary investigation of strength development in Jamaican red mud composites. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 18, n. 6, 1996, p. 371-379. DOI [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00027-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00027-3).

GORE, M. S. **Geotechnical characterization of bauxite residue (red mud)**. 2015. 283 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculty of the Graduate School, University of Texas, Austin, Texas, USA, 2015. Disponível em: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/32596/GORE-DISSERTATION-2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 22 jul. 2021.

GORE, M. S. *et al.* Geotechnical Characterization of Compacted Bauxite Residue for Use in Levees. **Geo-Chicago 2016**, Reston, Virginia, USA, 2016, p. 299-310. DOI <https://doi.org/10.1061/9780784480137.030>. Trabalho apresentado na Geo-Chicago 2016, 2016, Chicago, USA.

GRÄFE, M.; POWER, G.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: III. Alkanity and associated chemistry. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1-2, 2011, p. 60-79. DOI <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.004>.

GRÄFE, M.; POWER, G.; KLAUBER, C. **Review of Bauxite Residue Alkalinity and Associated Chemistry**: CSIRO Document DMR-3610. Australia: CSIRO Minerals, 2009. Disponível em:

https://enfo.hu/sites/default/files/v%C3%B6r%C3%B6siszpa%20k%C3%A9mia%20%C3%A9s%20%C3%BAgoss%C3%A1g_1.pdf. Acesso em: 4 ago. 2021.

GRAY, D. H.; SOMOGYI, F. **Engineering properties and dewatering characteristics of red mud tailings**: Interim report (DRDA Project 340364. Ann Arbor, Michigan, USA: University of Michigan, 1974. Disponível em: <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/5210/bac3636.0001.001.pdf?sequence=5&isAllowed=y>. Acesso em: 19 jul. 2021.

GRECCO, S. de T. F.; RANGEL, M. do C.; URQUIETA-GONZÁLEZ, E. A. Zeólitas hierarquicamente estruturadas. **Química Nova**, [s. l.], v. 36, n. 1, 2013, p. 131-142. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/Znp5Mhzv5jvRxtrT7y3kn5j/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 13 ago. 2021.

GU, H.; WANG, N. Leaching of uranium and thorium from red mud using sequential extraction methods. **Fresenius Environmental Bulletin**, [s. l.], v. 22, n. 9A, 2013, p. 2763-2769. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Hannian-Gu/publication/258220598_Leaching_of_uranium_and_thorium_from_red_mud_using_sequential_extraction_methods/links/0a85e530561acc76fa000000/Leaching-of-uranium-and-thorium-from-red-mud-using-sequential-extraction-methods.pdf. Acesso em: 4 set. 2021.

GÜÇLÜ, K.; APAK, R. Modelling of Copper (II), Cadmium (II), and Lead (II) Adsorption on Red Mud from Metal-EDTA Mixture Solutions. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 228, n. 2, 2000, p. 238-252. DOI <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.6974>.

HABASHI, F. A short history of hydrometallurgy. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 79, n. 1-2, 2005, p. 15-22. DOI <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.01.008>.

HABASHI, F. Karl Josef Bayer (1847-1904). **International Committee for Study of Bauxite, Alumina and Aluminium (ICSOPA) Newsletter**, Quebec, Canada, v. 14, 2015, p. 26-31. Disponível em: <https://old.icsoba.org/sites/default/files/ICSOBANewsletterDecember2015.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2021.

HE, J. *et al.* Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 37, 2013, p. 108-118. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.010>.

HENNEBEL, T. *et al.* Biotechnologies for critical raw material recovery from primary and secondary sources: R&D priorities and future perspectives. **New Biotechnology**, [s. l.], v. 32, n. 1, 2015, p. 121-127. DOI <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.08.004>.

HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K.; GROCCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 146, n. 1-3, 1999, p. 359-374. DOI [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00798-5](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00798-5).

HSU, W. W.; MAA, J. R. Red Mud Used as a Desulfurizing Agent for Removing Hydrogen Sulfide in Gas. **Chemistry**, Taiwan, v. 45, n. 3, 1956. DOI <http://dx.doi.org/10.6623%2fchem.1956020>.

INSTITUT FÜR SELTENE ERDEN UND STRATEGISCHE METALLE. Rare earth elements – prices. **Institut seltene Erden**, Zug, Suíça, 2021. Disponível em: <https://en.institut-seltene-erden.de/our-service-2/Metal-prices/rare-earth-prices/>. Acesso em: 8 set. 2021.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. Bauxite Residue Management. **World Aluminium**, Londres, Reino Unido, 2018. Disponível em: <https://bauxite.world-aluminium.org/refining/bauxite-residue-management/>. Acesso em: 28 set. 2021.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Bauxite Residue Management: Best Practice**. Londres: IAI, 2015. Disponível em: https://bauxite.world-aluminium.org/fileadmin/user_upload/Bauxite_Residue_Management_-_Best_Practice__English__Compressed.pdf. Acesso em: 7 ago. 2021.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Opportunities for use of bauxite residue in Supplementary Cementitious Materials**. 2. ed. Londres, Reino Unido: IAI, 2020. Disponível em: <https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2020/03/Opportunities-for-Use-of-Bauxite-Residue-in-Cement.zip>. Acesso em: 29 set. 2021.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. Refining Process. **World Aluminium**, Londres, Reino Unido, 2018. Disponível em: <https://bauxite.world-aluminium.org/refining/process/>. Acesso em: 28 set. 2021.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Technology Roadmap – Maximizing the use of Bauxite Residue in Cement**. Londres, Reino Unido: IAI, 2020. Disponível em: https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2021/03/technology_roadmap_-_br_use_in_cement_2020.pdf. Acesso em: 6 out. 2021.

ISMAIL, J.; JACOB, J. M.; MOHAMMADI, A. H. **An Overview of Coal Hydrogenation**. Durban, África do Sul: University of KwaZulu-Natal, 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32723.53281>. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Amir_Mohammadi7/publication/336669621_An_Overview_of_Coal_Hydrogenation/links/5dab16fe92851c577eb8b776/An-Overview-of-Coal-Hydrogenation.pdf. Acesso em: 4 set. 2021.

JAIN, S. **Red mud as a construction material by using bioremediation**. 2014. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India, 2014. Disponível em: <http://ethesis.nitrkl.ac.in/6065/1/E-187.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2021.

JANDER, G. *et al.* **Jander-Blasius lehrbuch der analytischen und präparativen anorganischen Chemie**. 2. ed. [S. l.]: Hirzel, 2006.

JITSANGIAM, P.; CHUMMUNEERAT, S.; NIKRAZ, H. Engineering characteristics of cement modified base course material for Western Australian pavements. **Journal of Australian Civil Engineering**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2013, p. 13-21.

JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. Coarse bauxite residue for roadway construction materials. **International Journal of Pavement Engineering**, [s. l.], v. 14, n. 3, 2013, p. 265-273. DOI <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.705843>.

KALKAN, E. Utilization of red mud as a stabilization material for the preparation of clay liners. **Engineering Geology**, [s. l.], v. 87, n. 3-4, 2006, p. 220-229. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.002>.

KARIMI, E. *et al.* Red Mud as a Catalyst for the Upgrading of Hemp-Seed Pyrolysis Bio-oil. **Energy & Fuels**, [s. l.], v. 24, n. 12, 2010, p. 6586-6600. DOI <https://doi.org/10.1021/ef101154d>.

KASAI, T.; MIZOTA, T. Utilization of Red Mud Exhausted from Alumina Production Industry. **Shigen-to-Sozai**, Japão, v. 112, n. 3, 1996, p. 131-139. ISSN 1880-6244. DOI <https://doi.org/10.2473/shigentozai.112.131>. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/shigentozai1989/112/3/112_3_131/_pdf/-char/en. Acesso em: 13 ago. 2021.

KASAI, T.; MIZOTA, T.; TAKAHASHI, K. Sulfuric Acid Leaching of Red Mud. **Resources Processing**, Japão, v. 39, n. 4, 1992, p. 135-142. ISSN 1883-9150. DOI

<https://doi.org/10.4144/rpsj1986.39.135>. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/rpsj1986/39/4/39_4_135/_pdf/-char/en. Acesso em: 13 ago. 2021.

KASAI, T. *et al.* Hydration enthalpy for synthetic and cation exchanged A-type zeolites with special reference to zeolite heat pump media. **Mineralogical Journal**, Japão, v. 17, n. 4, 1994, p. 170-180. ISSN 1881-4174. DOI <https://doi.org/10.2465/minerj.17.170>. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/minerj/17/4/17_4_170/_pdf/-char/en. Acesso em: 13 ago. 2021.

KAUSSEN, F. M.; FRIEDRICH, B. Methods for Alkaline Recovery of Aluminum from Bauxite Residue. **Journal of Sustainable Metallurgy**, [s. l.], v. 2, 2016, p. 353-364. DOI <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0059-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40831-016-0059-3.pdf>. Acesso em: 20 set. 2021.

KAZAK, O.; TOR, A. In situ preparation of magnetic hydrochar by co-hydrothermal treatment of waste vinasse with red mud and its adsorption property of Pb (II) in aqueous solution. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 393, 2020, p. 122391. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122391>.

KAZAK, O.; EKER, Y. R.; TOR, A. In situ magnetization of porous carbon beads by pyrolysis of waste red mud doped polysulfone beads for efficient oil sorption. **Chemical Engineering and Processing – Process Intensification**, [s. l.], v. 158, 2020, p. 108190. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108190>.

KELLER, V. *et al.* Effectiveness of Fly Ash and Red Mud as Strategies for Sustainable Acid Mine Drainage Management. **Minerals**, [s. l.], v. 10, n. 8, 2020, p. 707. DOI <https://doi.org/10.3390/min10080707>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/8/707/pdf>. Acesso em: 11 ago. 2021.

KHAITAN, S.; DZOMBAK, D. A.; LOWRY, G. V. Neutralization of Bauxite Residue with Acidic Fly Ash. **Environmental Engineering Science**, [s. l.], v. 26, n. 2, 2009, p. 431-440. DOI <https://doi.org/10.1089/ees.2007.0232>.

KHAITAN, S. *et al.* Field Evaluation of Bauxite Residue Neutralization by Carbon Dioxide, Vegetation and Organic Amendments. **Journal of Environmental Engineering**, Reston,

Virginia, USA, v. 136, n. 10, 2010, p. 1045-1053. DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000230](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000230).

KHANZANCHI, A. C.; SAXENA, M. Interfacial Phenomena of New Natural (Organic) Fibres in Polymer Matrix for Construction Engineering. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE INTERFACES, 3., 1990, Cleveland, Ohio, USA. **Controlled Interphases in Composite Materials**. [s. l.]: Springer Dordrecht, 1990. cap. 70. p. 741-746. ISBN 978-94-011-7816-7. DOI https://doi.org/10.1007/978-94-011-7816-7_70.

KINNARINEN, T. *et al.* Recovery of sodium from bauxite residue by pressure filtration and cake washing. **International Journal of Mineral Processing**, [s. l.], v. 141, 2015, p. 20-26. DOI <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.06.006>.

KIRWAN, L. *et al.* Chemistry of bauxite residue neutralisation and aspects to implementation. **International Journal of Mineral Processing**, [s. l.], v. 119, 2013, p. 40-50. DOI <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.01.001>.

KLAUBER, C.; GRÄFE, M.; POWER, G. Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1-2, 2011, p. 11-32. DOI <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.007>.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais**. Tradução Rualdo Menegat. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. ISBN 978-85-7780-963-9. Disponível em: <https://dageoufba.files.wordpress.com/2013/08/manual-de-cic3aancia-dos-minerais-klein-e-dutrow.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2021.

KLOPRIES, B.; HODEK, W.; BANDERMANN, F. Catalytic hydroliquefaction of biomass with red mud and CoO-MoO₃ catalysts. **Fuel**, [s. l.], v. 69, n. 4, 1990, p. 448-455. DOI [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(90\)90312-E](https://doi.org/10.1016/0016-2361(90)90312-E).

KOLA, N.; DAS, S. K. Lateral earth pressure due to red mud using numerical analysis. *In*: INDIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, 2013, Roorkee, India. **Proceedings [...]**. [s. l.]: [s. n.], 2013.

KOLENCSIK-TÓTH, A. *et al.* Physical and chemical characterization of red mud in terms of its environmental effects. **Geosciences and Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 5, 2014, p. 129-137. ISSN 2063-6997. Disponível em: https://matarka.hu/koz/ISSN_2063-6997/Vol3_No5/ISSN_2063-6997_vol_3_no_5_2014_eng_129-137.pdf. Acesso em: 12 jul. 2021.

KOMNITSAS, K.; BARTZAS, G.; PASPALIARIS, I. Efficiency of limestone and red mud barriers: laboratory column studies. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 17, n. 2, 2004, p. 183-194. DOI <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.11.006>.

KOPELIOVICH, D. Bayer process. In: KOPELIOVICH, D. (ed.). **SubsTech: Substances & Technologies**. [S. l.]: [s. n.], 2012. Disponível em: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=bayer_process. Acesso em: 28 set. 2021.

KRUPAKARA, P. V. Corrosion Characterization of Al6061/Red Mud Metal Matrix Composites. **Portugaliae Electrochimica Acta**, [s. l.], v. 31, n. 3, 2013, p. 157-164. ISSN 1647-1571. DOI 10.4152/pea.201303157.

KUMAR, H. *et al.* Influence of in-house produced biochars on cracks and retained water during drying-wetting cycles: comparison between conventional plant, animal and nano-biochars. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 20, 2020, p. 1983-1996. DOI <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02573-8>.

KUMAR, S.; PRASAD, A. Parameters controlling strength of red mud-lime mix. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 6, 2017, p. 743-757. DOI <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1304280>.

KURTOĞLU, S. M.; UZUN, A. Red Mud as an Efficient, Stable and Cost-Free Catalyst for CO_x-Free Hydrogen Production from Ammonia. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 6, 2016, p. 32279. DOI <https://doi.org/10.1038/srep32279>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep32279.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2021.

KUSHWAHA, S. S.; KISHAN, D. Stabilization of Red Mud by Lime and Gypsum and Investigating Its Possible Use in Geoenvironmental Engineering. **Geo-Chicago 2016**, Reston, Virginia, USA, 2016, p. 978-988. DOI <https://doi.org/10.1061/9780784480144.097>. Trabalho apresentado na Geo-Chicago 2016, 2016, Chicago, USA.

LAZOU, A. *et al.* The Utilization of Bauxite Residue with a Calcite-Rich Bauxite Ore in the Pedersen Process for Iron and Alumina Extraction. **Metallurgical and Materials Transactions B**, [s. l.], v. 52, 2021, p. 1255-1266. DOI <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02086-w>. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11663-021-02086-w.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2021.

LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. 3rd ed. New York: Wiley, 1999.

LI, J. *et al.* Chemical and geotechnical properties of red mud at Liulin, China. *In: GEOSHANGHAI 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE: GEOENVIRONMENT AND GEOHAZARD (GSIC 2018)*, 2018, Shanghai, China. **Proceedings [...]**. Cingapura: Springer, 2018. p. 405-414. ISBN 978-981-13-0128-5. DOI https://doi.org/10.1007/978-981-13-0128-5_45.

LI, L. Y. A study of iron mineral transformation to reduce red mud tailings. **Waste Management**, [s. l.], v. 21, n. 6, 2001, p. 525-534. DOI [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00107-0](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00107-0).

LI, Y. *et al.* Phosphate removal from aqueous solutions using raw and activated red mud and fly ash. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 137, n. 1, 2006, p. 374-383. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.011>.

LIMA, H. B. S. *et al.* Estudo da influência da sedimentação gravitacional da lama vermelha na resistência à chamas de compósitos poliméricos. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v. 4, n. 3, 2020, p. 1166-1173. ISSN 2595-3621. DOI 10.34115/basrv4n3-033.

LIMA, M. S. S. **Avaliação do emprego de lama vermelha no desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas à quente**. 2015. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/158875/337471.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 8 jul. 2021.

LIMA, M. S. S. *et al.* Red mud application in construction industry: *review of benefits and possibilities*. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 251, n. 012033, 2017. ISSN 1757-899X. DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012033>. Trabalho apresentado na 3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2017), 2017, Riga, Letônia. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/251/1/012033/pdf>. Acesso em: 6 set. 2021.

LIU, Y.; NAIDU, R. Hidden values in bauxite residue (red mud): Recovery of metals. **Waste Management**, [s. l.], v. 34, n. 12, 2014, p. 2662-2673. DOI <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.003>.

LIU, Y. *et al.* Characterization of red mud derived from a combined Bayer Process and bauxite calcination method. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 146, n. 1-2, 2007, p. 255-261. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.015>.

LOGOMERAC, V. G. Complex utilisation of red mud by smelting and solvent extraction. **Travaux Compléts Internationaux d'Étude de Bauxites, Alumina et Aluminium**, [s. l.], v. 15, 1979, p. 279-285.

LOKESH, K. S. *et al.* Effect of Red Mud Particles on Scratch Resistance of Aluminum Based Metal Matrix Composites. **Journal of Aerospace Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 1, 2018, p. 24-29. ISSN 2376-4821. DOI 10.11648/j.ajae.20180501.14.

LÓPEZ, A. *et al.* Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 zeolite and Red Mud. **Applied Catalysis B: Environmental**, [s. l.], v. 104, n. 3-4, 2011, p. 211-219. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.03.030>.

MA, D. *et al.* Feasible conversion of solid waste bauxite tailings into highly crystalline 4A zeolite with valuable application. **Waste Management**, [s. l.], v. 34, n. 11, 2014, p. 2365-2372. DOI <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.012>.

MAGALHÃES, E. M. **Estudo da extração de compostos de ferro da lama vermelha visando a concentração e/ou de compostos de titânio**. 2012. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/4459/1/Tese_EstudoExtracaoCompostos.pdf. Acesso em: 11 ago. 2021.

MANFROI, E. P. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. 2009. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/92863/271247.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 8 jul. 2021.

MARANGON, M. Compressibilidade e Adensamento dos Solos. *In*: MARANGON, M. **Mecânica dos Solos II**. Juiz de Fora, MG: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018. cap. 3. p. 61-93. Disponível em:

<https://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/MARANGON-M.-Dez-2018-Cap%c3%adtulo-03-Compressibilidade-e-Adensamento-dos-Solos.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2021.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia do trabalho científico: projetos de pesquisa / pesquisa bibliográfica / teses de doutorado, dissertações de mestrado, trabalhos de conclusão de curso**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017. ISBN 978-85-97-01066-4.

MARINUCCI, G. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia**. São Paulo: Artliber, 2011. ISBN 978-8588098636.

MARQUES, E. P. **Cinética Química**. 2019. 186 f. Notas de aula.

MARTINEZ, E. L. **Investigation of sedimentation behaviour of microcrystalline cellulose**. 2012. 44 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Department of Chemical and Biological Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Suécia, 2012. Disponível em: <https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/156624/1/156624.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2021.

MÁRTIRES, R. A. C. Alumínio. *In*: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Economia Mineral do Brasil**. Coordenação Antônio Fernando da Silva Rodrigues. Brasília: DNPM, 2009. cap. 4.1. p. 179-197. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/4-1-aluminio>. Acesso em: 24 jun. 2021.

MEDEIROS, M. A. R. **Propriedades mecânicas de compósitos de PVC reciclado reforçados com fibras de sisal de nylon 6**. 2006. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/9720>. Acesso em: 18 ago. 2021.

MINGXIAO, L.; YUANHANG, L.; FULI, NI. Studies on structure of and thermostabilizing mechanism of polyvinyl chloride filled with red mud. **Polymeric Materials Science & Technology**, China, 1989.

MIURA, Y. S. **Revegetação do Depósito de Resíduos de Bauxita: Uma Análise de Técnicas Promissoras para o Caso da Hydro Alunorte**. 2016. 48 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais) – Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS), Instituto Tecnológico Vale (ITV), Belém, 2016. Disponível em: <https://www.itv.org/wp->

content/uploads/2018/03/Dissertac%CC%A7a%CC%83o-Yuuki-Silveira-Miura.pdf. Acesso em: 5 jul. 2021.

MOMBELLI, D. *et al.* Iron Recovery from Bauxite Tailings Red Mud by Thermal Reduction with Blast Furnace Sludge. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 9, n. 22, 2019, p. 4902. DOI <https://doi.org/10.3390/app9224902>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/22/4902/pdf>. Acesso em: 11 ago. 2021.

MYERS, J. G.; FIELD, J. H. **Method of removing sulfur oxides from gases**. Depositante: U.S. Department of the Interior. Procurador: John G. Myers; Joseph H. Field. US n. 3580702A. Depósito: 10 Sept. 1968. Concessão: 25 May 1971. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/1c/ef/91/a5300ea690324c/US3580702.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2021.

NAMASIVAYAM, C.; ARASI, D. J. S. E. Removal of congo red from wastewater by adsorption onto red mud. **Chemosphere**, [s. l.], v. 34, n. 2, 1997, p. 401-417. DOI [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(96\)00385-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(96)00385-2).

NARAYANAN, R. P. *et al.* A regiocentric economic sensitivity analysis for scandium recovery from red mud. **Materials Today: Proceedings**. [s. l.], v. 41, n. 3, 2021, p. 577-582. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.252>.

NERY, K. D. **Caracterização geotécnica e avaliação da compactação de um resíduo de produção de alumina desaguado por filtro prensa**. 2013. 143 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9RVGKQ/1/geotecniatransportes_kellendiasnery_dissertacao.pdf. Acesso em: 20 jul. 2021.

NEWSON, T. *et al.* Effect of Structure on the Geotechnical Properties of Bauxite Residue. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [s. l.], v. 132, n. 2, 2006, p. 143-151. DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:2\(143\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:2(143)).

NGUYEN, Q. D.; BOGER, D. V. Application of rheology to solving tailings disposal problems. **International Journal of Mineral Processing**, [s. l.], v. 54, n. 3-4, 1998, p. 217-233. DOI [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(98\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(98)00011-8).

NORSK HYDRO. **Annual report – 2020**. Oslo, Noruega: Norsk Hydro ASA, 2021. Disponível em: <https://www.hydro.com/globalassets/download-center/investor-downloads/ar20/annual-report-2020-new.pdf>. Acesso em: 5 set. 2021.

NUNES, K. S. **Influência da lama vermelha e fibra de curauá, *Ananas lucidus*, Mill, nas propriedades físicas e mecânicas em compósitos de poliéster isofitálico.** 2015. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015. Disponível em: <http://ppgеп.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/Dissertacao2015-PPGEP-MP-KamilaSilvaNunes.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.

NUNN, R. F. Advances in red mud dewatering and disposal technologies. *In: WELCH, B. (ed.). Light Metals.* Warrendale, Pennsylvania, USA: The Minerals, Metals and Materials Society, 1998. p. 107-113. ISBN 978-0873393904.

OCHSENKÜHN-PETROPOULU, M. *et al.* Pilot-Plant Investigation of the Leaching Process for the Selective Recovery of Scandium from Red Mud. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 41, n. 23, 2002, p. 5794-5801. DOI <https://doi.org/10.1021/ie011047b>.

OCHSENKÜHN-PETROPULU, M. *et al.* Recovery of lanthanides and yttrium from red mud by selective leaching. **Analytica Chimica Acta**, [s. l.], 1996, p. 249-254. DOI [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(95\)00486-6](https://doi.org/10.1016/0003-2670(95)00486-6).

OCHSENKÜHN-PETROPULU, M.; LYBEROPULU, Th.; PARISSAKIS, G. Selective separation and determination of scandium from yttrium and lanthanides in red mud by a combined ion exchange/solvent extraction method. **Analytica Chimica Acta**, [s. l.], v. 315, n. 1-2, 1995, p. 231-237. DOI [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(95\)00309-N](https://doi.org/10.1016/0003-2670(95)00309-N).

OLIVEIRA, A. A. S. *et al.* Magnetic Amphiphilic Composites Based on Carbon Nanotubes and Nanofibers Grown on an Inorganic Matrix: Effect on Water-Oil Interfaces. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [s. l.], v. 21, n. 12, 2010, p. 2184-2188.

OLIVEIRA, A. A. S. *et al.* Production of nanostructured magnetic composites based on Fe⁰ nuclei coated with carbon nanofibers and nanotubes from red mud waste and ethanol. **Applied Catalysis B: Environmental**, [s. l.], v. 105, n. 1-2, 2011, p. 163-170. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.04.007>.

OLIVEIRA, F. S. de. **A bauxita de Barro Alto (GO): gênese e evolução mineralógica, micromorfológica e geoquímica.** 2011. 149 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011. ISSN 85-230-0108-6. Disponível em:

http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2890/1/TESE_BauxitaBarroAlto.PDF.

Acesso em: 23 jun. 2021.

OLIVEIRA, L. S. de *et al.* Compósitos produzidos com resíduo de lama vermelha e fibras naturais: análise de flamabilidade. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, 2020, p. 42767-42776. ISSN 2525-8761. DOI 10.34117/bjdv6n7-047.

PALMER, S. J.; FROST, R. L. Characterisation of bauxite and seawater neutralised bauxite residue using XRD and vibrational spectroscopic techniques. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 45, 2009, p. 55-63. DOI <https://doi.org/10.1007/s10853-008-3123-y>.

PAN, S. Y. *et al.* CO₂ Mineralization and Utilization using Steel Slag for Establishing a Waste-to-Resource Supply Chain. **Scientific Reports**, [s. l.] v. 7, n. 1, 2017, p. 17227. DOI <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17648-9>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-17648-9.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2021.

PANDA, I. *et al.* Characterization of red mud as a structural fill and embankment material using bioremediation. **International Biodeterioration & Biodegradation**, [s. l.], v. 119, 2017, p. 368-376. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.11.026>.

PARAMGURU, R. K.; RATH, P. C.; MISRA, V. N. Trends in red mud utilization – a review. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, [s. l.], v. 26, n. 1, 2004, p. 1-29. DOI <https://doi.org/10.1080/08827500490477603>.

PATEL, S.; PAL, B. K.; PATEL, R. K. A novel approach in red mud neutralization using cow dung. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 25, n. 1-8, 2018, p. 12841-12848. DOI <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1374-y>.

PEDERSEN, H. Fremstilling av Aluminumoksid av Lere. **Tids. Kemi og Bergv.**, [Oslo, Noruega?], v. 4, 1924, p. 14.

PEIXOTO, E. M. A. Elemento Químico: Alumínio. **Química Nova na Escola**, São Paulo, n. 13, 2001. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc13/13-aluminio.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2021.

POULIN, É; BLAIS; J. F.; MERCIER, G. Transformation of red mud from aluminium industry into a coagulant for wastewater treatment. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 92, n. 1-2, 2008, p. 16-25. DOI <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.02.004>.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1-2, 2011, p. 33-45. DOI <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.006>.

PRADHAN, J.; DAS, S. N.; THAKUR, R. S. Adsorption of Hexavalent Chromium from Aqueous Solution by Using Activated Red Mud. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 217, n. 1, 1999, p. 137-141. DOI <https://doi.org/10.1006/jcis.1999.6288>.

PRADHAN, J. *et al.* Characterization of Indian red muds and recovery of their metal values. *In*: WAYNE, H (ed.). **Light Metals**. Warrendale, Pennsylvania, USA: The Minerals, Metals and Materials Society, 1996. p. 87-92. ISBN 0-87339-312-0. Trabalho apresentado na Annual meeting and exhibition of the Minerals, Metals and Materials Society (TMS), 1996, Anaheim, California, USA.

PRASAD, N. **Development and characterization of metal matrix composite using red mud an industrial waste for wear resistant applications**. 2006. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India, 2006. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.627.325&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 28 ago. 2021.

PRATT, K. C.; CHRISTOVERSON, V. Hydrogenation of a model hydrogen-donor system using activated red mud catalyst. **Fuel**, [s. l.], v. 61, n. 5, 1982, p. 460-462. DOI [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(82\)90072-2](https://doi.org/10.1016/0016-2361(82)90072-2).

QIANG, Z. *et al.* A simple hydrothermal synthesis of zeolite X from bauxite tailings for highly efficient adsorbing CO₂ at room temperature. **Microporous and Mesoporous Materials**, [s. l.], v. 287, 2019, p. 77-84. DOI <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.05.062>.

RAGHAVAN, P. K. N.; KSHATRIYA, N. K.; WAWRYNINK, K. Recovery of Metal Values from Red Mud. *In*: LINDSAY, S. J. (ed.). **Light Metals**. [S. l.]: Springer, 2011. cap. 18. p. 103-106. ISBN 978-3-319-48160-9. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-48160-9_18.

RASPOPOV, N. A. *et al.* Reduction of iron oxides during the pyrometallurgical processing of red mud. **Russian Metallurgy (Metally)**, [s. l.], v. 2013, n. 1, 2013, p. 33-37. DOI <https://doi.org/10.1134/S0036029513010114>.

REDDY, N. G.; RAO, B. H. Assessment of dispersion characteristics of red mud waste from physical tests. *In*: INDIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE (GEONEST), 2017, Guwahati,

India. **Proceedings [...]**. Guwahati, India: Indian Institute of Technology, 2017. p. 4-7. Disponível em: https://www.academia.edu/download/57048900/IGC-2017-Th05_546.pdf. Acesso em: 12 jul. 2021.

REDDY, N. G.; RAO, B. H. Compaction and consolidation behaviour of untreated and treated waste of Indian red mud. **Geotechnical Research**, [s. l.], v. 5., n. 2, 2018, p. 106-121. ISSN 2052-6156. DOI <https://doi.org/10.1680/jgere.18.00005>. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/jgere.18.00005>. Acesso em: 16 jul. 2021.

REDDY, N. G.; RAO, B. H. Evaluation of the Compaction Characteristics of Untreated and Treated Red Mud. **Geotechnical Special Publications**, Reston, Virginia, USA, n. 272, 2016, p. 23-32. DOI <https://doi.org/10.1061/9780784480151.003>. Trabalho apresentado na Geo-Chicago 2016, 2016, Chicago, USA.

REDDY, N. G.; RAO, B. H.; REDDY, K. R. Biopolymer amendment for mitigating dispersive characteristics of red mud waste. **Géotechnique Letters**, [s. l.], v. 8, n. 3, 2018, p. 201-207. ISSN 2045-2543. DOI <https://doi.org/10.1680/jgele.18.00033>.

REDDY, P. S. *et al.* Properties and Assessment of Applications of Red Mud (Bauxite Residue): Current Status and Research Needs. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 12, 2021, p. 1185-1217. DOI <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01089-z>.

RESENDE, E. C. de. **Aplicação da lama vermelha como catalisador em processos oxidativos/redutivos**. 2012. 145 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2012. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/4982/1/TESE_Aplica%C3%A7%C3%A3o%20da%20lama%20vermelha%20como%20catalisador%20em%20processos.pdf. Acesso em: 30 ago. 2021.

RICHARDSON, K. A. **The thorium, uranium and zirconium concentrations in bauxites and their relationship to bauxite genesis**. 1959. 63 f. Dissertação de Mestrado – Rice University, Houston, Texas, USA, 1959. Disponível em: <https://scholarship.rice.edu/bitstream/handle/1911/90127/RICE1163.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 1 set. 2021.

RIVAS MERCURY, J. M. *et al.* Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 3, 2010, p. 445-460. ISSN 1517-7076. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rmat/a/9ZKJhqvQqSgCxwL3zw3BnZc/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 8 jul. 2021.

ROUT, S. K.; SAHOO, T.; DAS, S. K. Utility of red mud as an embankment material. **International Journal of Earth Science and Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 6, 2012, p. 1645-1651.

RUBINOS, D.; SPAGNOLI, G; BARRAL, M. T. Assessment of bauxite refining residue (red mud) as a liner for waste disposal facilities. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, [s. l.], v. 29, n. 6, 2015, p. 433-452. DOI <https://doi.org/10.1080/17480930.2013.830906>.

RUSSKIKH, A. *et al.* Turning Waste into Value: Potassium-Promoted Red Mud as an Effective Catalyst for the Hydrogenation of CO₂. **ChemSusChem**, v. 13, n. 11, 2020, p. 2981-2987. DOI <https://doi.org/10.1002/cssc.202000242>.

SAMAL, P.; MANDAVA, R. K.; VUNDAVILLI, P. R. Dry sliding wear behavior of Al 6082 metal matrix composites reinforced with red mud particles. **SN Applied Sciences**, [s. l.], v. 2, 2020, p. 313. DOI <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2136-2>.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C. de; DUTRA, A. J. B. Bauxita. *In*: LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral do Ministério da Ciência e Tecnologia (CETEM-MCT), 2008. cap. 14. p. 311-337. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/522/1/Rochas%20Min.Ind.2a%20edicao%20%28Adao%20e%20F.Lins%29.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2021.

SANTOS, E. E. S. dos. *et al.* Análise da variação da granulometria da lama vermelha nas propriedades dos compósitos. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v. 4, n. 3, 2020, p. 1437-1445. ISSN 2595-3621. DOI 10.34115/basrv4n3-054.

SATAPATHY, A.; PATNAIK, A. Analysis of Dry Sliding Wear Behavior of Red Mud Filled Polyester Composites using the Taguchi Method. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [s. l.], v. 29, n. 19, p. 2883-2897. DOI <https://doi.org/10.1177%2F0731684408092453>.

SHANNON, E. E.; VERGHESE, K. I. Utilization of Alumized Red Mud Solids for Phosphorus Removal. **Journal of the Water Pollution Control Federation**, [s. l.], v. 48, n. 8, 1976, p. 1948-1954.

SHI, W. *et al.* Low cost red mud modified graphitic carbon nitride for the removal of organic pollutants in wastewater by the synergistic effect of adsorption and photocatalysis. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 237, 2020, p. 116477. DOI <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116477>.

SHIAO, S. J.; AKASHI, K. Phosphate Removal from Aqueous Solution from Activated Red Mud. **Journal of the Water Pollution Control Federation**, [s. l.], v. 49, n. 2, 1977, p. 280-285.

SHIMANO, S.; KOGA, T. Utilization of red mud as a raw material for the cement industry. *In*: PETERSON, W. S. (ed.). **Light Metals**. [S. l.]: The Metallurgical Society of AIME, 1979. p. 53-68. ISBN 978-0895201454.

SHIN, W. S.; KANG, K.; KIM, Y. K. Adsorption Characteristics of Multi-Metal Ions by Red Mud, Zeolite, Limestone, and Oyster Shell. **Environmental Engineering Research**, [s. l.], v. 19, n. 1, 2014, p. 15-22. ISSN 2005-968X. DOI <http://dx.doi.org/10.4491/eer.2014.19.1.015>.

SHINZATO, M. C. *et al.* Efeito da adição de lama vermelha nas propriedades eletroquímicas e de adsorção um latossolo vermelho. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 36, n. 1, 2015, p. 51-65. Disponível em: <https://revistaig.emnuvens.com.br/rig/article/view/491/473>. Acesso em: 11 ago. 2021.

SILVA, P. H. A. da. **Simulação numérica das poropressões em aterros construídos com resíduo da produção de alumina desaguado por filtros prensa**. 2020. 187 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/34554/1/SIMULA%c3%87%c3%83O%20NUM%c3%89RICA%20DAS%20POROPRESS%c3%95ES%20EM%20ATERROS%20CONSTRU%c3%8dDOS%20COM%20RES%c3%8dDUO%20DA%20PRODU%c3%87%c3%83O%20DE%20ALUMINA%20DESAGUADO%20POR%20FILTROS%20PRENSA.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2021.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. da. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, 2007, p. 322-338. ISSN 1517-7076. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/7wWLD4vdCd6nWnNqYzcLXfs/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

SINGH, A. P. *et al.* Adsorption of 1-Butanethiol from kerosene oil on red mud. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 66, n. 3, 1988, p. 501-504. DOI <https://doi.org/10.1002/cjce.5450660324>.

SINGH, A. P.; SINGH, P. C.; SINGH, V. N. Removal of 1-butanethiol from diesel oil by red mud. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 27, n. 11, 1988, p. 2101-2104. DOI <https://doi.org/10.1021/ie00083a024>.

SINGH, B.; GUPTA, M. Surface treatment of red mud and its influence on the properties of particulate-filled polyester composites. **Bulletin of Materials Science**, [s. l.], v. 18, n. 5, 1995, p. 603-621. DOI <https://doi.org/10.1007/BF02744847>.

SINGH, B.; GUPTA, M.; VERMA, A. Mechanical behaviour of particulate hybrid composite laminates as potential building materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 9, n. 1, 1995, p. 39-44. DOI [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)92859-F](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)92859-F).

SIVIERO, P. da R. **Análise da variação de compressibilidade e permeabilidade de rejeito de mineração de bauxita**. 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/197430/TCC%20-%20P%20C%20A9side%20da%20Rosa%20Siviero.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 jul. 2021.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Porto Alegre: AMGH, 2012.

SNARS, K; GILKES, R. J. Evaluation of bauxite residues (red muds) of different origins for environmental applications. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 46, n. 1, 2009, p. 13-20. DOI <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.06.014>.

SOUSA, L. S. de. **Materiais baseados em carvão de PET e lama vermelha ativados com CO₂ para remoção de paracetamol em água**. 2017. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2017. Disponível em: <http://bdtd.unifal-mg.edu.br:8080/bitstream/tede/1028/5/DISSERTA%20c3%87%20c3%83O%20Leonardo%20Siqueira%20de%20Sousa%202017.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.

SOUSA, P. V. C. *et al.* Estudo comparativo da granulometria da lama vermelha de bauxita visando a aplicação em compósitos de matriz polimérica. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 12., 2017, São Carlos, SP. [Anais]. São Paulo: Blucher, 2017. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br/chemicalengineeringproceedings/cobeqic2017/426.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2021.

SOUZA, W. B. de; PARRA, D. F.; LUGÃO, A. B. Avaliação de propriedades Mecânicas e Térmicas do Compósito de Poli (metacrilato de metila) carregado com “lama vermelha de bauxita”. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS*, 8., 2005, Águas de Lindóia, SP. **Anais [...]**. [S. l.]: [s. n.], 2005. p. 10-11.

SPOSITO, G. **The Chemistry of Soils**. Oxford, UK: Oxford University Press, 2008.

SRIVASTAVA, R. K. Geotechnical aspects of soil-industrial waste interaction behavior. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT*, 1997, Atenas, Grécia. **Proceedings [...]**. v. 2. [S. l.]: [s. n.], 1997. p. 23-27.

SUMMERS, R. N. *et al.* Bauxite residue (red mud) improves pasture growth on sandy soils in Western Australia. **Australian Journal of Soil Research**, [s. l.], v. 34, n. 4, 1996, p. 569-581. DOI <https://doi.org/10.1071/SR9960569>.

SUNDARAM, R.; GUPTA, S. Constructing Foundations on Red Mud. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS*, 6., 2010, Delhi, India. [Proceedings]. Edição SRIVASTAVA, R. K.; RAMANA, G. V.; SHAHU, J. T. [s. l.]: [s. n.], 2010.

SUTAR, H. *et al.* Progress of Red Mud Utilization: An Overview. **American Chemical Science Journal**, [s. l.], v. 4, n. 3, 2014, p. 255-279. Disponível em: <http://dspace.nitrkl.ac.in/dspace/bitstream/2080/2062/1/Progress%20of%20Red%20Mud%20Utilization%20An%20Overview.pdf>. Acesso em: 6 set. 2021.

SWARUP, D.; SHARMA, A. S. Extraction of Titanium dioxide from Red Mud. **Transactions of the Indian Ceramic Society**, [s. l.], v. 4, n. 2, 1945, p. 75-80. DOI <https://doi.org/10.1080/0371750X.1945.10877783>.

TABEREAUX, A. Addressing the Challenge of Bauxite Residue. **Light Metal Age**, United States, Mar. 11 2019. Disponível em: <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/smelting/article-addressing-the-challenge-of-bauxite-residue/>. Acesso em: 7 jul. 2021.

TABEREAUX, A.; PETERSON, R. D. Aluminum Production. *In*: SEETHARAMAN, S. **Treatise on Process Metallurgy**. v. 3. [s. l.]: Elsevier, 2014. cap. 2.5. p. 839-917. ISBN 978-0-08-096988-6. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00023-7>.

TAM, P. W. Y.; PANIAS, D.; VASSILIADOU, V. Sintering Optimisation and Recovery of Aluminum and Sodium from Greek Bauxite Residue. **Minerals**, [s. l.], v. 9, n. 10, 2019, p. 571-592. DOI <https://doi.org/10.3390/min9100571>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/10/571/pdf>. Acesso em: 28 set. 2021.

TAYE, E. A. *et al.* Hemp Fiber Reinforced Red Mud/Fly Ash Geopolymer Composite Materials: Effect of Fiber Content on Mechanical Strength. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 3, 2021, p. 511. DOI <https://doi.org/10.3390/ma14030511>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/3/511/pdf>. Acesso em: 11 ago. 2021.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3rd ed. New York: Wiley, 1996. ISBN 0-471-08658-4. Disponível em: <https://cequcest.files.wordpress.com/2015/09/terzaghi129883967-soil-mechanics-in-engineering-practice-3rd-edition-karl-terzaghi-ralph-b-peck-gholamreza-mesri-1996.pdf>. Acesso em: 6 jul. 2021.

THOMPSON, A.; GOYNE, K. W. Introduction to the Sorption of Chemical Constituents in Soils. **Nature Education Knowledge**, [s. l.], v. 4, n. 4, 2012, p. 1-7.

THORNBUR, M. R.; BINET, D. Caustic soda adsorption on Bayer residues. *In*: INTERNATIONAL ALUMINA QUALITY WORKSHOP, 5., 1999, [Australia?]. **[Proceedings]**. Bunbury, Australia: Alumina Quality Workshop Inc., 1999. Disponível em: https://www.aqw.com.au/papers.raw?task=callelement&item_id=493&element=5b3ad36a-1a89-48ba-98f7-2f27a877a55d&method=download. Acesso em: 3 ago. 2021.

THORNBUR, M. R.; HUGHES, C. A. The mineralogical and chemical properties of red mud waste from the Western Australia alumina industry. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BAUXITE TAILINGS, 1986, Kingston, Jamaica. **Proceedings [...]**. Kingston, Jamaica: Jamaica Bauxite Institute: University of the West Indies, 1986.

TILLEY, G. S.; MILLAR, R. W.; RALSTON, O. C. **Acid Processes for the Extraction of Alumina**. Washington, DC: U.S. Department of Commerce, 1927.

TRAORÉ, S. *et al.* Synthesis and Characterization of a Red Mud and Rice Husk Based Geopolymer for Engineering Applications. **Macromolecular Symposia: Special Issue – polymertec**. [s. l.], v. 373, n. 1, 2017, p. 160090. DOI <https://doi.org/10.1002/masy.201600090>.

TUAZON, D.; CORDER, G. D. Life cycle assessment of seawater neutralised red mud for treatment of acid mine drainage. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 52, n. 11, 2008, p. 1307-1314. DOI <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.010>.

UJACZKI, É. *et al.* Recovery of Gallium from Bauxite Residue Using Combined Oxalic Acid Leaching with Adsorption onto Zeolite HY. **Journal of Sustainable Metallurgy**, [s. l.], v. 5, 2019, p. 262-274. DOI <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00226-w>.

UJACZKI, É. *et al.* Re-using bauxite residues: benefits beyond (critical raw) material recovery. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, [s. l.], v. 93, n. 9, 2018, p. 2498-2510. DOI <https://doi.org/10.1002/jctb.5687>.

UNITED STATES OF AMERICA. U.S. Department of Energy. U.S. Energy Information Administration. **2020 Uranium Marketing Annual Report**. Washington, DC: U.S. EIA, 2021. Disponível em: <https://www.eia.gov/uranium/marketing/pdf/umar2020.pdf>. Acesso em: 9 set. 2021.

VENANCIO, L. C. A. **Desenvolvimento de unidade piloto de transferência de massa gás/líquido: Redução da reatividade do resíduo da indústria de alumina através da reação com gases de combustão**. 2013. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/8248/1/Tese_DesenvolvimentoUnidadePiloto.pdf. Acesso em: 23 jul. 2021.

VIJAYA, H. M.; SAMUEL, T.; WESLY, P. K. Assessment of red mud as a construction material: a review. **Indian Journal of Scientific Research**, [s. l.], v. 17, 2018, p. 473-478.

VILLA-VÉLEZ, H. A. **Adsorção do Corante Azul de Metileno em Esferas de Vidro: Roteiro Experimental**. 2020. 8 f. Notas de aula.

VILLAR, L. F. S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 2002. 461 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <https://www2.dbd.puc->

rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=9824854_02_Indice.html.
Acesso em: 23 jun. 2021.

VOGT, M. F. Development studies on dewatering of red mud. *In: ANNUAL MEETING OF AIME*, 103., 1974, Dallas, Texas, USA. **Proceedings [...]**. [S. l.]: [s. n.], 1974.

WAGH, A. S. Settling properties of dilute Bayer process muds. **Particle and Multiphase Processing**, [s. l.], v. 3, 1987, p. 461-469.

WANG, M.; LIU, X. Applications of red mud as an environmental remediation material: A review. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 408, 2021, p. 124420. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124420>.

WANG, P.; LIU, D. Physical and chemical properties of sintering red mud and Bayer red mud and the implications for beneficial utilization. **Materials**, [s. l.], v. 5, n. 10, 2012, p. 1800-1810. DOI <https://doi.org/10.3390/ma5101800>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/5/10/1800/pdf>. Acesso em: 15 jul. 2021.

WANG, W.; PRANOLO, Y.; CHENG, C. Y. Metallurgical processes for scandium recovery from various resources: A review. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 108, n. 1-2, 2011, p. 100-108. DOI <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.03.001>.

WANG, W.; PRANOLO, Y.; CHENG, C. Y. Recovery of scandium from synthetic red mud leach solutions by solvent extraction with D2EHPA. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 108, 2013, p. 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.02.001>.

WANG, Y. *et al.* Comparison study of phosphorus adsorption on diferente waste solids: Fly ash, red mud, and ferric-alum water treatment residues. **Journal of Environmental Sciences**, [s. l.], v. 50, 2016, p. 79-86. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.04.025>.

WANG, Y. *et al.* Methane explosion suppression characteristics based on the NaHCO₃/red-mud composite powders with core-shell structure. **Journal of Hazardous Materials**, v. 335, 2017, p. 84-91. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.04.031>.

WEFERS, K.; MISRA, C. **Oxides and Hydroxides of Aluminum**. [s. l.]: ALCOA Laboratories, 1987. Disponível em: http://epsc511.wustl.edu/Aluminum_Oxides_Alcoa1987.pdf. Acesso em: 22 jun. 2021.

WEHR, J. B.; FULTON, I.; MENZIES, N. W. Revegetation strategies for bauxite refinery residue: a case study of Alcan Gove in Northern Territory, Australia. **Environmental**

Management, [s. l.], v. 27, n. 3, 2007, p. 297-306. DOI <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0385-2>.

WEI, Q. *et al.* Synthesis of Ni-Modified ZSM-5 Zeolites and Their Catalytic Performance in *n*-Octane Hydroconversion. **Frontiers in Chemistry**, [s. l.], v. 28, 2020. DOI <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.586445>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2020.586445/full>. Acesso em: 13 ago. 2021.

WELLER, S. *et al.* Coal Hydrogenation Catalysts Batch Autoclave Tests. **Industrial and Engineering Chemistry**, [s. l.], v. 42, n. 2, 1950, p. 330-334. DOI <https://doi.org/10.1021/ie50482a032>.

WONG, J. W. C. **Sodium release characteristics and revegetation of fine bauxite refining residue (red mud)**. 1990. Tese de Doutorado – School of Biological and Environmental Sciences, Murdoch University, Perth, WA, Australia, 1990.

WOODWARD, H. J.; HOSSNER, L.; BUSH, J. Ameliorating caustic properties of aluminum extraction residue to establish a vegetative cover. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, [s. l.], v. 43, n. 10, 2008, p. 1157-1166. DOI <https://doi.org/10.1080/10934520802171659>.

WU, W. *et al.* Red mud for the efficient adsorption of U (VI) from aqueous solution: Influence of calcination on performance and mechanism. **Journal of Hazardous Materials**, v. 409, 2021, p. 124925. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124925>.

XIE, W. M. *et al.* Accelerated crystallization of magnetic 4A-zeolite synthesized from red mud for application in removal of mixed heavy metal ions. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 358, 2018, p. 441-449. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.007>.

XUE, S. *et al.* A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (Red mud). **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 23, 2016, p. 1120-1132. DOI <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4558-8>.

YANIK, J. *et al.* The catalytic effect of Red Mud on the degradation of poly (vinyl chloride) containing polymer mixture into fuel oil. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 73, n. 2, 2001, p. 335-346. DOI [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00095-7](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00095-7).

YUAN, H. C. *et al.* Gamma-ray induced polymerization of unsaturated polyester in red mud. *In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY SYMPOSIUM*, 1969, Munique, Alemanha. **Large Radiation Sources for Industrial Processes**. Viena, Áustria: Agência Internacional de Energia Atômica, 1969. p. 383-398.

YUANJIANG, T.; HUIWEN, L. Mechanism of light resistance and heat ageing resistance for red mud-PVC composite plastics. **Science Bulletin**, [s. l.], n. 6, 1984, p. 798-801.

ZENG, H. *et al.* Progress on the Industrial Applications of Red Mud with a Focus on China. **Minerals**, [s. l.], v. 10, n. 9, 2020, p. 773. DOI <https://doi.org/10.3390/min10090773>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/9/773/pdf>. Acesso em: 6 set. 2021.

ZHANXUN, C.; XIQING, W.; SHUZHEN, X. A Study on Pipes of Red Mud-Poly (Vinyl Chloride) Composites (part B). **Journal of Qingdao University of Science Technology**, Qingdao, China, 1990.

ZHU, C. *et al.* Removal of cadmium from aqueous solutions by adsorption on granular red mud (GRM). **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 57, n. 1, 2007, p. 161-169. DOI <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.03.013>.

ZINOVEEV, D. *et al.* Extraction of Iron from Russian Red Mud by a Carbothermic Reduction and Magnetic Separation Process. **Materials Proceedings**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 23-27. DOI <https://doi.org/10.3390/IEC2M-09247>. Trabalho apresentado na 1st International Electronic Conference on Materials and Metals. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4605/3/1/23/pdf>. Acesso em: 6 out. 2021.