



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

BRENDA CARVALHO DOS SANTOS

CARACTERIZAÇÃO MINERAL DOS REJEITOS DE BAUXITA DA
MINA DE JURUTI - PA

SANTARÉM, PARÁ

2017

BRENDA CARVALHO DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO MINERAL DOS REJEITOS DE BAUXITA DA
MINA DE JURUTI - PA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Oeste do Pará – Campus Santarém, para obtenção do grau de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia e posteriormente Bacharel em Engenharia Física.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Roberval Pimentel Santos

SANTARÉM, PARÁ

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIGI/UFOPA

S237c Santos, Brenda Carvalho dos
Caracterização mineral dos rejeitos de bauxita da Mina de Juruti - Pa./
Brenda Carvalho dos Santos. – Santarém, 2017.
62 fls.: il.
Inclui bibliografias.

Orientador Manoel Roberval Pimentel Santos
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do
Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Curso de Bacharelado
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

1. Bauxita – Juruti (PA). 2. Difração. 3. Rejeitos. I. Santos, Manoel Roberval Pi-
mentel, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 549.53098115

TERMO DE APROVAÇÃO

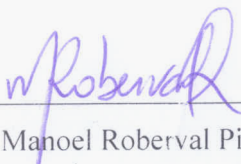
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi analisado pelos membros da Banca Examinadora, abaixo assinados:

APROVADO EM: 16/06/2017

TITULO: CARACTERIZAÇÃO MINERAL DOS REJEITOS DE BAUXITA DA MINA DE JURUTI – PA

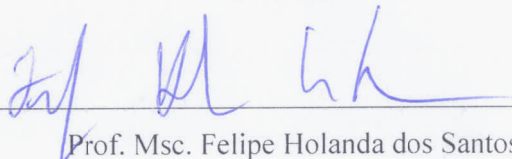
BRENDA CARVALHO DOS SANTOS

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Manoel Roberval Pimentel Santos

Orientador



Prof. Msc. Felipe Holanda dos Santos

1º membro



Prof.^a Msc. Fabriciana Vieira Guimarães

2º membro

SANTARÉM – PARÁ

2017

As famílias Carvalho e Santos pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

À minha família e amigos por me apoiarem e motivarem todos os dias na busca de sempre querer muito mais e ir além.

Ao professor Manoel Roberval por trabalharmos juntos neste projeto e ter aceitado ser meu orientador.

À Alcoa, que propiciou a coleta das amostras.

Ao Avelino Morganti por todas as horas de ajuda e apoio para realização deste trabalho. As minhas companheiras de piso na Espanha Marian e Laura, que durante meu intercambio me apoiaram e me ajudaram mesmo com uma xicara de chá, ou uma palavra amiga a não desistir em nenhum momento neste trabalho.

“A medida da inteligência é a capacidade de mudar”.

Albert Einstein.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14.
1.1.	Aspectos Gerais	14.
1.2.	Objetivos	15.
1.3.	Geral	15.
1.4.	Específicos	15.
1.5.	Justificativa	15.
2.	REVISÃO BILIOGRÁFICA	16.
2.1.	Mineração e Tratamento de Minérios	16.
2.2.	Alumínio	21.
2.2.1.	Etapas de Obtenção	21.
2.2.2.	Produção de Alumínio	24.
2.2.3.	Preços	25.
2.3.	Bauxita	26.
2.3.1.	Produção de Bauxita	29.
2.3.2.	Processo de Formação da Bauxita Amazônica	30.
2.3.3.	Importância Econômica	32.
2.4.	Lavra de Bauxita na mina de Juruti	33.
2.5.	Beneficiamento na mina de Juruti	38.
2.6.	Barragem de Rejeito	39.
2.7.	Caracterização Mineralógica	42.
2.7.1.	Identificação dos Minerais	44.
2.7.2.	Análise Mineralógica Quantitativa	45.
2.8.	Técnicas de Caracterização	45.
2.8.1.	Difratometria de Raios X	45.
2.8.2.	Espectrometria de Fluorescência de Raios X	48.
3.	MATERIAL E MÉTODOS	48.
3.1.	Área de Estudo	48.
3.2.	Coleta das Amostras	49.
3.3.	Equipamentos	50.
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50.
4.1.	Difratometria de Raios X	50.

4.2.	Espectrometria de Fluorescência de Raios X	52.
5.	CONCLUSÃO	56.
	REFERÊNCIAS	57.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Inter-relação dos recursos naturais
- Figura 2 - Fluxograma típico de tratamento de minério
- Figura 3 - Fluxograma do beneficiamento de minério de ferro de Carajás
- Figura 4 - Fluxograma do processo de produção de alumínio com cubas com anodos Soderberg
- Figura 5 - Etapas da fabricação do alumínio
- Figura 6 - Distribuição dos depósitos de bauxita no mundo
- Figura 7 - Províncias de depósitos lateríticos no mundo
- Figura 8 - Perfil da mina de Juruti
- Figura 9 - Funcionamento da lavra *strip mining*
- Figura 10 - Tira de bauxita lavrada preparada
- Figura 11 - Supressão vegetal com motosserras
- Figura 12 - Realização da retirada e carregamento de *topsoil*
- Figura 13 - Processo de desmonte da camada de bauxita
- Figura 14 - Fluxograma do beneficiamento de bauxita.
- Figura 15 - Lagoa de Sedimentação
- Figura 16 - Barragem de rejeito Votorantim Metais
- Figura 17 - Rompimento de barragem atingindo o Rio Fubá e depois o rio Muriaé
- Figura 18 - Rompimento da barragem de Fundão.
- Figura 19 - Principais etapas da caracterização mineralógica de um minério
- Figura 20 - Princípio de funcionamento da microscopia óptica
- Figura 21 - Esquematização de uma aberração esférica longitudinal e transversal
- Figura 22 - Aberração cromática axial
- Figura 23 - Corte num retículo cúbico esquemático e representação de diversos planos de repetição sistemática detectados por DRX
- Figura 24 - Exemplo de DRX do quartzo
- Figura 25 – Esquematização de um difratômetro de raios X para método de pó
- Figura 26 – Localização geográfica do município de Juruti
- Figura 27 - Identificação dos picos das amostras coletadas em diferentes regiões da polpa
- Gráfico 1 - Comparações de preços de mercado do alumínio do período de 2013 a 2016
- Gráfico 2 - Composição do rejeito de bauxita (%)
- Gráfico 3 - Elementos no rejeito de bauxita (%)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção mundial de alumínio primário (milhões/ton.)

Tabela 2 - Produção mundial de bauxita

Tabela 3 - Produção brasileira de Bauxita por empresa

Tabela 4 - Resultados da EFRX

RESUMO

A bauxita é a principal fonte de alumina tendo diferenças nos tipos de jazimentos, caracterizando seus usos específicos, de acordo com sua composição mineralógica e das impurezas associadas. Na mina de Juruti – Pará adota-se o método de lavra e desmonte do estéril do minério que são feitos mecanicamente com tratores. O tratamento do minério envolve apenas britagem e lavagem, não sendo utilizado nenhum processo químico nesta etapa. Cerca de 25% do produto extraído da mina de Juruti é descartado por baixo teor de minério, sendo denominado rejeito e não passando por qualquer análise e/ou monitoramento específicos, além daqueles realizados na própria estrutura da bacia. Apesar de não haver nenhum processo químico envolvido no beneficiamento da bauxita, isso não garante que o rejeito gerado, não represente perigo podendo representar um sério problema ambiental devido à alta quantidade de sílica reativa. No trabalho foi realizada a análise da composição mineralógica a fim de verificar a possibilidade de síntese de novos materiais. Seis amostras foram coletadas e submetidas às análises de Difração (DRX) e Fluorescência (FRX) de raios X. Preliminarmente verificou-se com DRX um padrão com as principais fases cristalográficas: Hematita (Fe_2O_3), Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$), Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Anatásio (TiO_2) e Quartzo (SiO_2). As medidas de FRX confirmaram quantitativamente com os principais óxidos: Fe_2O_3 (62,78%), SiO_2 (15,15%), Al_2O_3 (14,02%), TiO_2 (7,39%), encontrados em cada amostra já conhecidos da bauxita, e mostraram também elementos químicos não esperados na localidade e em quantidades bem elevadas. Os resultados mostram que a composição do rejeito tem potencial para ser reaproveitado na síntese de novos materiais como incremento em materiais da construção civil, por exemplo, além de contribuir com a sustentabilidade e preservação de acidentes como rompimento de barragens de rejeito.

Palavras-Chave: Difração, Fluorescência, Rejeito, Bauxita.

ABSTRACT

Bauxite is the main source of alumina having different types of betonies deposits, characterizing its specific uses, according to its mineralogical composition and associated impurities. At the Juruti - Pará mine, the method of mining and dismantling of the barren ore that is mechanically made with tractors is adopted. The treatment of the ore involves only crushing and washing, and no chemical process is used. About 25% of the product extracted from the Juruti mine is discarded for low aluminum content, being denominated tailings and not going through any specific analysis and / or monitoring, besides those realized in the own structure of the basin, before being sent where it is deposited. Although there is no chemical process involved in the beneficiation of bauxite, this does not guarantee that the waste generated will not pose a hazard and could represent a serious environmental problem in the future. In the work was carried out to the analysis of the mineralogical composition in order to verify the possibility of sintese new materials. Six samples were collected and submitted to X-ray diffraction (DRX) and X-ray fluorescence (FRX). Preliminarily it was verified with DRX a pattern with the main crystallographic phases: Hematite (Fe_2O_3), Kaolinite ($Al_2Si_2O_5$), Gibbsite ($Al(OH)_3$), Anatase (TiO_2) and Quartz (SiO_2). The FRX measurements confirmed quantitatively with the main oxides: Fe_2O_3 (62,78%); SiO_2 (15,15%); Al_2O_3 (14,02%); TiO_2 (7,39%), found in each known bauxite sample, and also showed unexpected chemical elements in the locality and in very high amounts. The results show that the composition of the tailings has the potential to be reused in the synthesis of new materials such as increase in construction materials, for example, in addition to contributing to the sustainability and the preservation of accidents such as the disruption tailings dams.

Keywords: Diffraction, Fluorescence, Tailings, Bauxite.

SIGLAS

ALCOA - Aluminum Company of America

AMB - Anuário Mineral Brasileiro

CBA - Companhia Brasileira Alumínio

CFEM – Compensação Financeira pela Exploração de Recursos

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

DRX – Difração de Raios X

EFRX – Espectrometria de Fluorescência de Raios X

FRX – Fluorescência de Raios X

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICDD - International Center for Diffraction Data

MCS – Mineral Commodity Summaries

MRN - Mineração Rio do Norte

PIB – Produto Interno Bruto

UFC - Universidade Federal do Ceará

UFOPA - Universidade Federal do Oeste do Pará

USGS – United States Geological Survey

1. INTRODUÇÃO

1.1. Aspectos Gerais

Segundo Sampaio (2005), a única fonte economicamente viável do alumínio é a bauxita, que tem o óxido de alumínio como seu principal componente. Este metal é cada vez mais indispensável nos dias de hoje, possuindo inúmeras aplicações, por isso sua demanda se mantém em alta há vários anos. A bauxita é um minério de coloração avermelhada, com mais de 40% de alumina Al_2O_3 . Já o alumínio em si, é o terceiro elemento em abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e silício (SAMPAIO et al,2005).

Em 2013 a produção nacional de bauxita alcançou 32,8 milhões de toneladas, deixando o Brasil como o terceiro produtor em todo o mundo e o quarto em reservas, segundo o USGS em 2014. De acordo com o DNPM o Pará foi responsável por 90% da produção do país, com mais de 29 milhões de toneladas produzidas (SANTANA, 2014).

Dados recentes revelam que as reservas mundiais de bauxita somaram 28,1 bilhões de toneladas, das quais 2,6 bilhões estão no Brasil, o que deixa o país com a terceira maior reserva, atrás de Guiné e Austrália com 7,4 e 6,5 bilhões de toneladas respectivamente (USGS, 2015).

As reservas minerais de bauxita no Brasil estão localizadas em diversos municípios distribuídos por todo o país, as principais estão registradas conforme os dados do AMB, porém não corresponde à totalidade das reservas nacionais, nem tampouco as reservas de cada município correspondem à totalidade de reserva dos municípios (PINHEIRO et al, 2016).

A bauxita comercial representa 70% da bauxita bruta, o que significa uma perda de material sólido de 30% após a britagem, lavagem e classificação, processos que são normalmente utilizados para o beneficiamento da bauxita. Entretanto uma parte desta bauxita, denominada “rejeito”, é descartada durante o processo. O rejeito de bauxita é armazenado em grandes bacias, chamadas de “bacias de rejeito”. Este processo gera um elevado custo em transporte, armazenamento e monitoramento para atender às normas ambientais vigentes (QUARESMA, 2009).

Em termos de regionalização o Estado do Pará com 2,7 bilhões de toneladas detém quase 75% das reservas totais brasileiras, e o Estado de Minas Gerais participa com 16% com 560 milhões de toneladas sendo o restante distribuído por ordem de importância nos estados do Maranhão, Amapá, Santa Catarina, São Paulo, Rio de Janeiro, Amazonas e Goiás (QUARESMA, 2009).

Conforme dados do DNPM, só em 2016 o Pará foi responsável por extrair 96 milhões de toneladas de bauxita, quase 97,21% da produção nacional no mesmo período, sendo o município de Juruti o terceiro maior produtor do estado com 13,65%, o que gira em média 4,095 milhões de toneladas só de rejeito (DNPM, 2016).

Segundo o departamento de produção da Alcoa (2015), responsável pelo controle, qualidade e monitoramento da mineração em Juruti, há uma preocupação em assegurar os padrões exigidos pelos clientes, que geralmente incluem altos teores de alumina, ferro e sílica, além da umidade. O fato é que ainda existe uma carência em estudos mais detalhados e específicos sobre o rejeito, como por exemplo, sua produção durante o processo de beneficiamento da bauxita, caracterização deste material e etc.

Com base no exposto, neste trabalho foi realizada a análise da composição mineralógica do rejeito de bauxita, coletados na bacia de rejeito da usina de beneficiamento da mina de Juruti – Alcoa. Foram utilizadas as técnicas de DRX e EFRX para o estudo, com o intuito de fornecer informações técnicas para a viabilidade da síntese de novos materiais a partir do rejeito.

1.2. Objetivos

Os objetivos foram divididos em gerais e específicos.

1.2.1. Geral:

Caracterizar mineralogicamente o rejeito da bauxita da mina de Juruti-PA;

1.2.2. Específicos:

- Identificar as principais fases cristalográficas pelo método de DRX;
- Identificar qualitativamente os elementos químicos pelo método de EFRX;
- Verificar a viabilidade de síntese de novos materiais a partir do rejeito;

1.3. Justificativa

A bauxita é o principal minério da região oeste do Pará, sendo explorado pela MRN nas minas de Trombetas (município de Oriximiná) e pela Alcoa na mina de Juruti (município de Juruti). Além disso, a Norsh Hydro também explora bauxita na cidade de Paragominas (nordeste do estado) e a Votorantim Metais pretende instalar um complexo para extrair o minério e produzir alumina na cidade de Rondon do Pará (sudeste do estado) (FERREIRA, 2016).

Na mina de Juruti adota-se o método de lavra onde os desmontes do estéril e do minério são feitos mecanicamente com tratores. O processamento do minério envolve apenas britagem e lavagem, não sendo utilizado nenhum processo químico nesta etapa. A capacidade produtiva inicial de Juruti foi estimada 2,6 milhões de toneladas métricas anuais e atualmente a mina de Juruti opera com capacidade mínima de 4 milhões de toneladas métricas por ano (ALCOA, 2015).

Cerca de 25% do produto extraído da mina é descartado por apresentar um baixo teor de alumina e passa a ser denominado de rejeito sendo encaminhado para a bacia de rejeito onde fica depositado, sem nenhum estudo específico além do que já é realizado no beneficiamento.

Apesar de não haver nenhum processo químico envolvido no beneficiamento da bauxita em Juruti, isso não garante que o rejeito gerado não signifique perigo, o que pode representar um sério problema ambiental. Um exemplo ocorreu no Projeto Trombetas em Oriximiná, onde apesar de não ser ter sido utilizado qualquer processo químico nos rejeitos de bauxita, estes acabaram causando alterações nas características abióticas e estrutura das comunidades de macroinvertebrados bentônicos¹ do Lago Batata (FONSECA e ESTEVES, 1999).

2. REVISÃO BILIOGRÁFICA

2.1. Mineração e Tratamento de Minérios

Substância mineral é todo e qualquer tipo de material inorgânico com propriedade física e composição química encontrados na crosta terrestre. Os minerais são produtos naturais formados por um ou vários elementos químicos sempre os mesmos para cada mineral ou ainda alguma variação. Estes elementos estão unidos entre si de um modo muito preciso, fixo, característico de cada material (MENDONÇA, 2017).

A importância dos minerais é essencial para a vida humana. Segundo Kurusu (2009), a mineração é uma atividade tão importante para o desenvolvimento econômico quanto social em muitos países, em especial no Brasil, onde a indústria extrativa mineral representou em 2008 R\$ 2,9 trilhões, ou seja 3% do PIB nacional segundo dados do IBGE (2008).

Pelo fato de serem recursos não renováveis, os minerais sempre trazem preocupação quanto à sua escassez. Estes recursos finitos vêm apresentando, há algumas décadas, altos preços, o que aumenta ainda mais essa preocupação. Ainda existem diversas incertezas quanto

¹ Seres que se caracterizam por habitar o sedimento aquático ou sua superfície.

à classificação de recursos e suas possíveis reservas, que apontam novos recursos de ampliação física do aproveitamento de recursos não renováveis, o que também demanda novas pesquisas tanto quantitativas - no intuito de estimar as reservas destes recursos finitos não-renováveis, como também pesquisas referentes a aplicabilidade e a reutilização destes recursos em novas tecnologias e processos (SUSLICK et al, 2005).

As pesquisas, o desenvolvimento de tecnologias e novos processos na área de materiais como por exemplo na avaliação, extração e localização de jazidas, além da ampliação física destes recursos, cooperam para a sustentabilidade, além do aumento na produtividade e qualidade de produtos, sendo todos estes processos interdependentes. Conforme ilustrado na Figura 1, há uma interdependência de questões que envolvem os recursos minerais como a economia, meio ambiente e sustentabilidade. Se não há um bom gerenciamento de quaisquer um destes recursos, isto afetará diretamente o outro em seus parâmetros de aplicabilidade (SUSLICK, et al, 2005).

Exemplificando mais claramente, em 1950 os recursos e reservas da bauxita eram de 1,4 bilhões de toneladas e cresceram em 2000 para 350 bilhões de toneladas, atualmente gira em torno de 790 bilhões de toneladas (USGS, 2017). Isso também ocorre com carvão, chumbo, ferro, gás natural, óleo, rocha asfáltica e etc. Isto demonstra que as reservas têm aumentado ao longo do tempo, pela descoberta de novas jazidas, o que prova que não está ocorrendo um problema de escassez para o futuro, mas sim um mal gerenciamento dos recursos devido a aspectos político-econômico-sociais (SUSLICK, et al, 2005).



Figura 1 - Inter-relação dos recursos naturais. Fonte: Suslick et al, 2005.

Definimos que o minério é toda rocha constituída por um mineral ou agregado de materiais que contém minerais valiosos economicamente. Estes são aproveitados como bens úteis designados de minerais-minério, os que não são aproveitados, seja o minério ou o conjunto de minerais é denominado *ganga* (CETEM, 2010).

A separação seletiva dos materiais ou operações de concentração tem como base as diferenças entre as propriedades do mineral-minério e da ganga. Para que seja concentrado é necessário que estejam liberados fisicamente, onde em um caso ideal, uma partícula deve apresentar uma única espécie mineralógica, para obter liberação do mineral onde é submetido por uma operação de redução de tamanho: cominuição (britagem e/ou moagem) variando de centímetros a micrometros (LUZ et al, 2010).

Como as operações de redução são caríssimas, fragmenta-se o necessário; ao evitar o excesso de cominuição, faz-se o uso de separação por tamanhos também conhecido como classificação. Quando este minério é submetido à redução, libera de maneira adequada seus minerais, podendo ser submetido novamente à redução, porém para a separação, sendo esta de espécie, onde obtém-se um concentrado e um rejeito (LUZ et al, 2010).

A etapa de concentração significa a retirada de grande parte da ganga presente no minério, em grande parte as operações de concentração são realizadas a úmido. Conforme Luz et al (2010), o minério bruto com procedência de uma mina da etapa de lavra, passa por várias operações unitárias classificadas como as seguintes e vistas na Figura 2:

- Cominuição: britagem e moagem;
- Peneiramento (separação de tamanhos);
- Classificação: ciclonação, em espiral;
- Concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação etc.;
- Desaguamento: espessamento e filtração;
- Secagem: secador rotativo, de leito fluidizado, *spray dryer*;
- Disposição de rejeito;

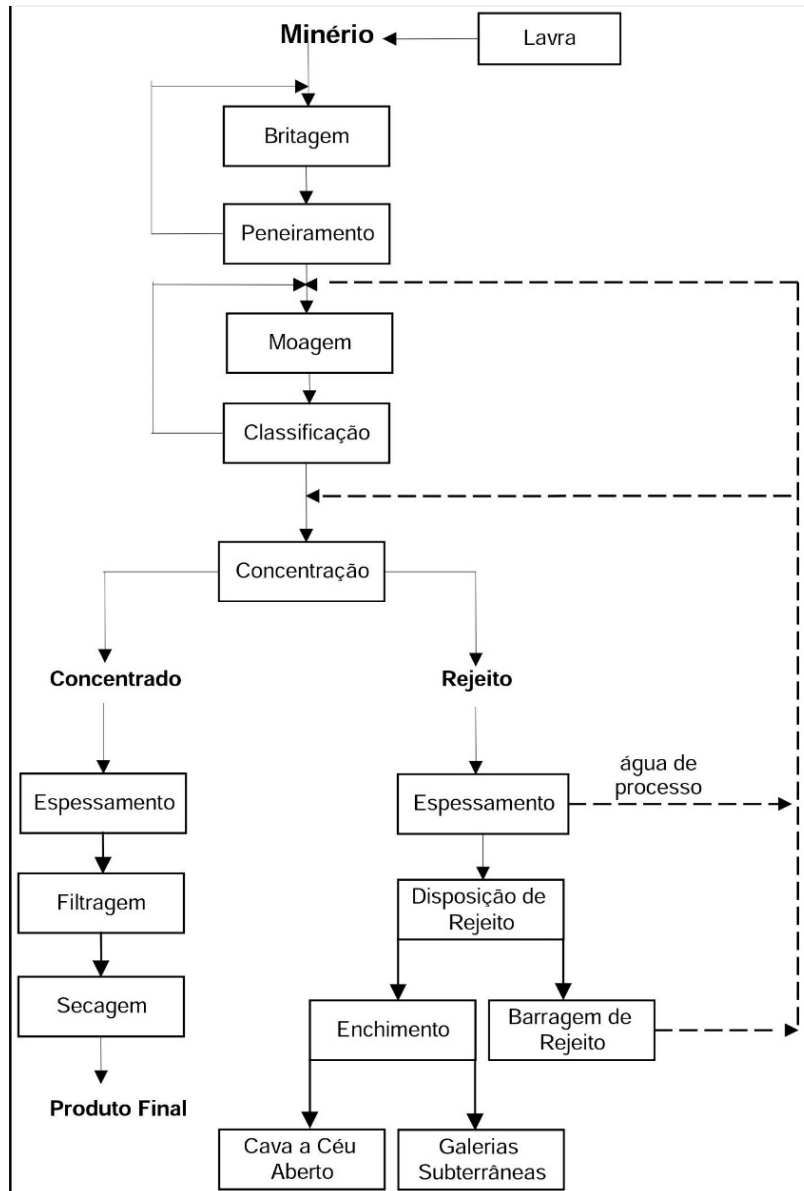


Figura 2 - Fluxograma típico de tratamento de minério. Fonte: CETEM, 2004.

Um dos grandes desafios nos últimos anos no tratamento de minérios veio pela chamada mineração sustentável exposto por Salum (2003), que traz consigo a busca por avanços e inovações na área. Há diversos aspectos a serem considerados que apresentam uma série de benefícios, como recuperação de baixo teor de minério e rejeitos da mineração, otimização no consumo de reagentes, energia e água no tratamento dos minérios e na busca por novos reagentes menos agressivos; além do fato de que as grandes empresas de mineração se comprometeram mais em tentar minimizar os impactos ao meio ambiente (SALUM, 2003).

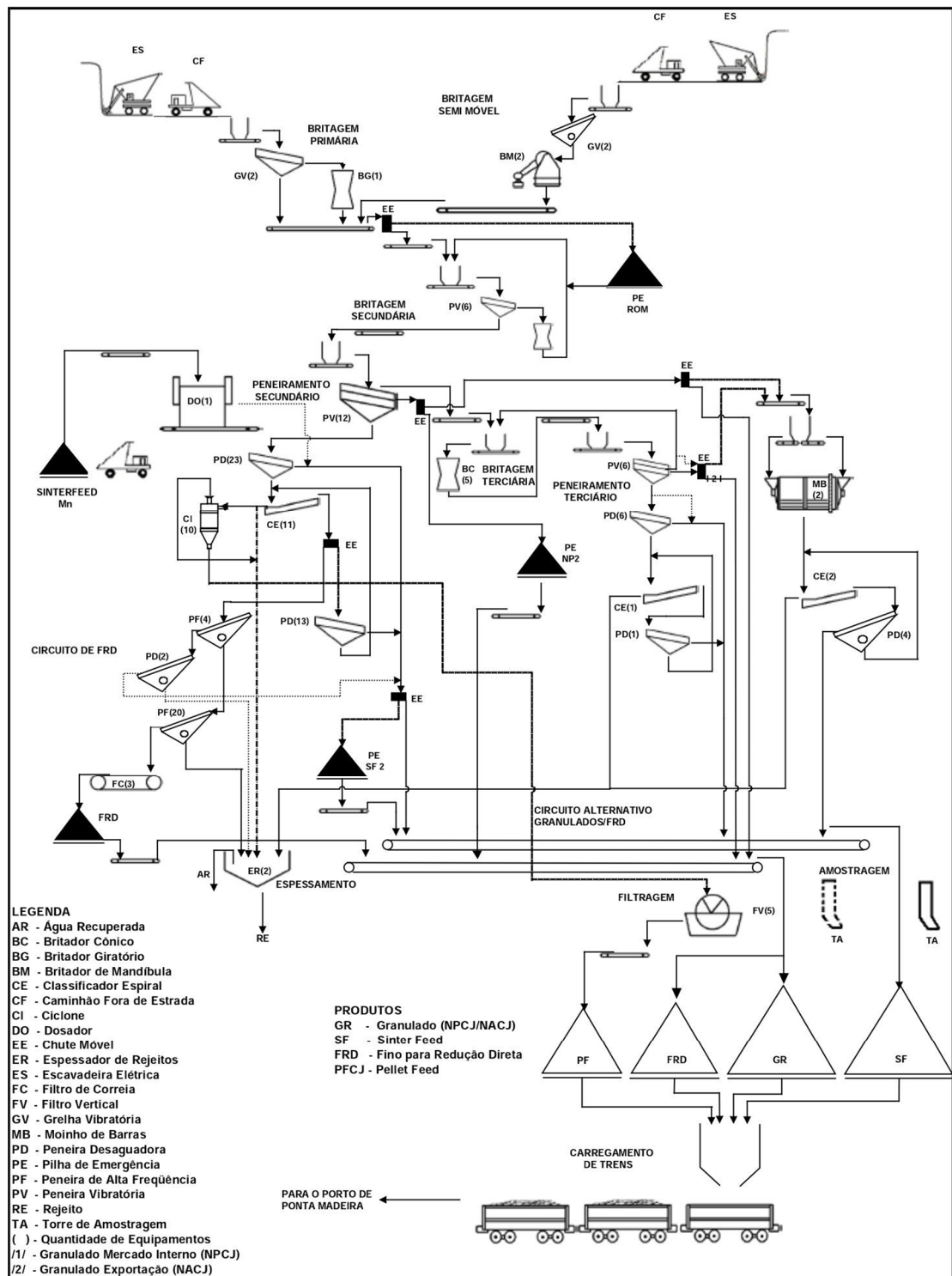


Figura 3 - Fluxograma do beneficiamento de minério de ferro de Carajás. Fonte: CETEM, 2001.

Para entendermos e esclarecermos a consistência das operações aplicadas nos minérios, há um exemplo real na Figura 3, que consiste em um fluxograma das etapas de tratamento de minério desde a extração, carregamento, britagem (primária e secundária), peneiramento, filtragem, separação de rejeito, amostragem, carregamento de trens, exportação e etc. este

exemplo em especial demonstra estas etapas sendo realizadas na usina de minério de ferro de Carajás, no município de Carajás, no Estado do Pará.

2.2. Alumínio

Conforme a ABAL (2008), há 6.000 a.C., na Pérsia eram produzidos vasos e recipientes com um tipo de argila contendo óxido de alumínio (alumina). Povos egípcios e babilônios há 3.000 a.C. depois, também utilizavam uma argila contendo alumina na fabricação de cosméticos e tópicos fazendo-se uso do que conhecemos como bauxita. De acordo com Bárdossy (1990) o registro mais antigo do metal alumínio foi constado em 300 a.C. em um cinto pertencente ao general chinês Chou Chou (ABAL, 2008) (BÁRDOSSY e ALEVA, 1990).

O alumínio (*Al*) é o terceiro elemento químico mais abundante na crosta terrestre correspondente a 7,5%, atrás somente do oxigênio, (*O*) 49, 5%, e do silício (*Si*) 25,7% (KURUSU, 2009). Como principal constituinte de diferentes rochas e solos, sua distribuição dá-se na crosta terrestre. Empregado em diversos setores e nas mais variadas atividades econômicas como transporte, construção, embalagens, indústrias e etc., têm características distintas; é um metal de baixo peso específico, resistente a corrosão, maleável, dúctil e possui alta condutibilidade elétrica e térmica (KURUSU, 2009).

O alumínio por via química foi obtido a primeira vez em 1854 por Henry Deville, sendo um ano depois exposto um lingote do metal, chamando a atenção por ser mais leve que o ferro. Em 1886, Paul Louis Toussaint Héroult, na França e Charles Martin Hall, nos Estados Unidos, separadamente e simultaneamente, por meio da redução eletrolítica da alumina dissolvida em banho fundido de criolita, desenvolveram o processo para obtenção de alumínio, onde denominaram este processo como Hall-Héroult, sendo fundamental para a indústria global de alumínio (SERMENTAL, 2015).

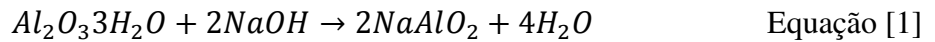
2.2.1. Etapas de Obtenção

De acordo com Chaves (2006) a produção de alumínio dá-se de quatro maneiras:

- Lavra e beneficiamento da bauxita²;
- Através do processo de Bayer tem-se a obtenção de alumina de alta pureza;
- Através do processo de Hall-Héroult ocorre a redução de eletrotérmica da alumina ao alumínio metálico;
- Transformação mecânica do alumínio em chapas, barras, perfis, fios e etc.;

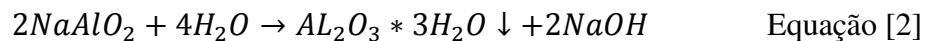
² Bauxita - único minério de alumínio economicamente viável.

A disposição em depósitos e a remoção de estéril se dá com a lavra que é a extração do minério na jazida, já o beneficiamento é a adequação do minério as especificações da granulometria que possui um valor mínimo para alumina e máximo para os contaminantes, o qual gera grandes frações de rejeitos que vão para as barragens de contenção, a parte beneficiada segue para as fábricas de alumina – as usinas metalúrgicas, onde no processo ocorre a reação com a soda cáustica em solução, como na Equação 1 (CHAVES, 2006).

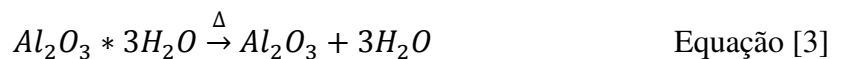


Gerando o aluminato de sódio que permanece em solução, a precipitação no minério ocorre pela presença de impurezas insolúveis, que resultam em sólidos finos separados nos processos de filtração e classificação, originando a lama vermelha um problemático resíduo composto de óxidos (Fe, Ti, SiO₂), silicatos de alumina e sódio hidratado, além de outros minerais, sendo a lama vermelha um dos problemas mais sérios industrialmente do alumínio, além do excessivo consumo de energia envolvido (KURUSU, 2009).

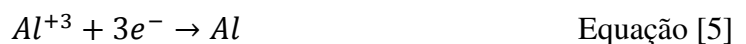
O processo de regeneração da alumina é decorrido da nucleação e cristalização com cristais de alumina, resultando na precipitação da alumina:



Para eliminar a água de hidratação, a alumina é filtrada e calcinada em fornos de leito. Este processo descrito, é o que conhecemos como processo de Bayer. Conforme a Equação 3, através do processo de Hall-Héroult obtém-se o alumínio metálico em usinas metálicas conhecidas como *smelters*, onde a redução do óxido de alumínio a alumínio metálico é realizada a altas temperaturas 930°C e em células eletrolíticas, utilizando como redutor o coque e como fundente a criolita ((NaF)3AlF)₃ como na Equação 4 (CHAVES, 2006):



O resultado da redução Al^{3+} ocorre no cátodo:



E da oxidação no carbono ânodo:



Com a criolita sintetizada a partir da fluorita (CaF_2), a reação eletrotérmica gera vapores que reagindo com o ar gera ácido fluorídrico (HF) reagindo com o alumínio metálico e carbono dos eletrodos (este sendo de grafite ou pasta de Soderberg³) gerando ao fim, tetrafluoreto de carbono. Normalmente uma linha de cubas para redução de alumina é instalada em um ou dois estreitos e longos edifícios denominados sala de cubas ou sala de fornos. Uma linha é composta por uma série de cubas eletrolíticas eletricamente ligadas em série, conectadas a um sistema de retificação de corrente, recebendo o fornecimento de energia elétrica usado no processo eletrolítico (ABAL, 2010).

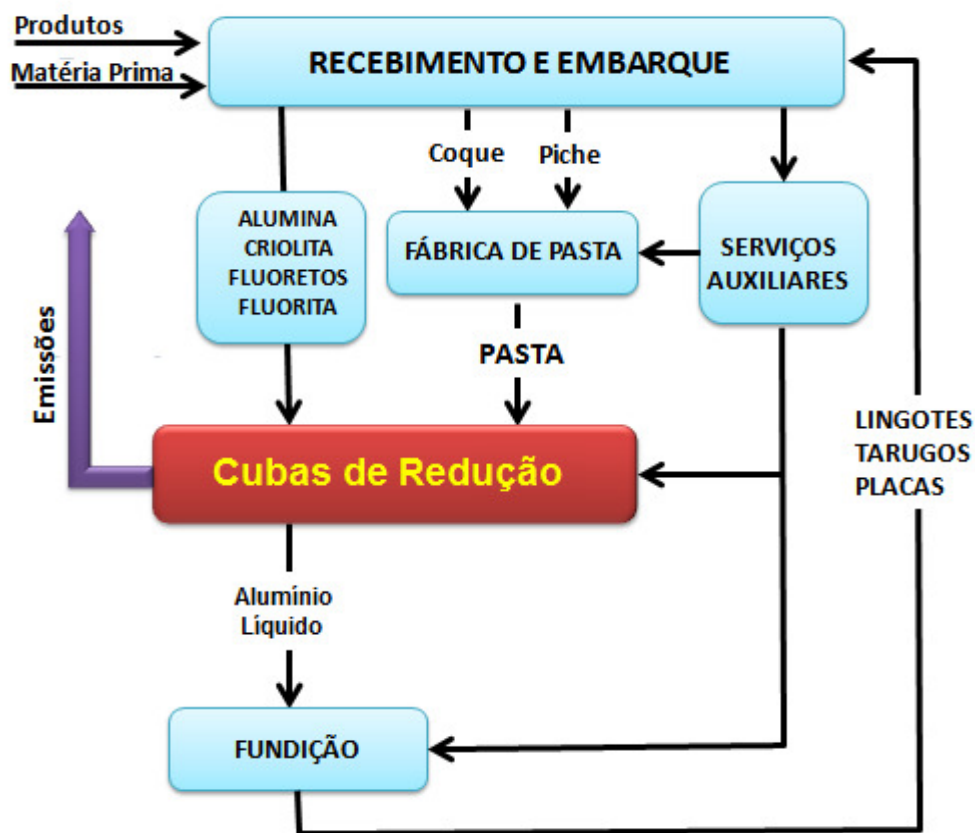


Figura 4 - Fluxograma do processo de produção de alumínio com cubas com anodos Soderberg. Fonte: ABAL, 2010.

As cubas são postas lado a lado, em uma ou mais fileiras na sala de cubas. Para proporcionar o bom funcionamento das cubas, as salas são ventiladas para manter as condições de trabalho adequadas já que porventura as cubas geram grandes quantidades de calor. Esta ventilação é a principal fonte de emissões da sala de cubas, o que a torna um ambiente poluído, porém altamente controlável em virtude das pequenas quantidades de enxofre (S) emitidas do

³ Pasta eletródica onde são preparados e misturados piche e coque para fazer briquetes, que são destinados a formar o anodo da cuba, através do cozimento *in situ*.

piche volatilizado além dos componentes orgânicos também poluentes como benzo (α) antraceno, benzofluoranteno, entre outros (ABAL, 2010) (KURUSU, 2009).

Podemos identificar na ilustração da Figura 5, por exemplo, o processo de obtenção do alumínio com um típico balanço de massas.

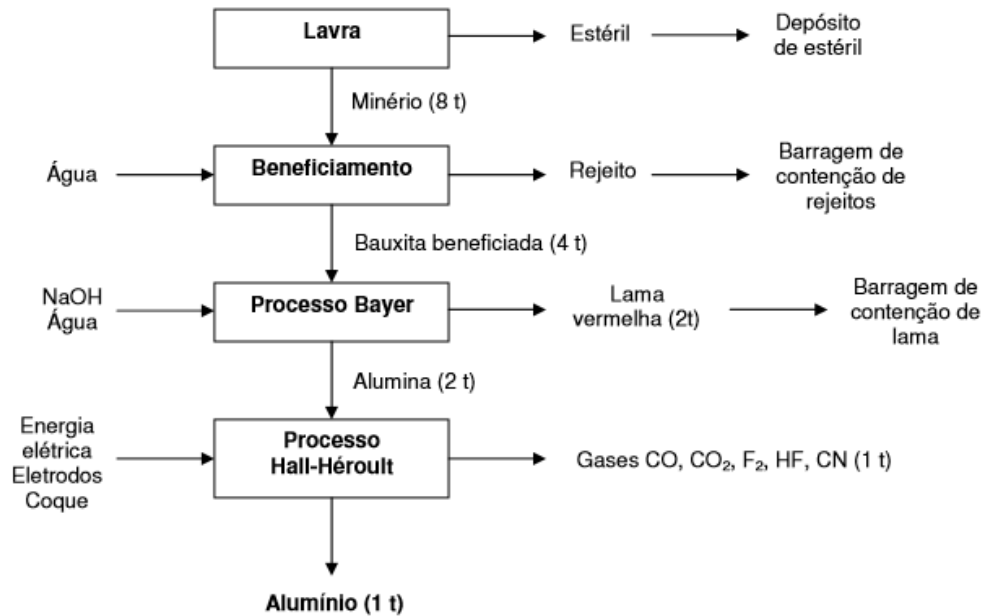


Figura 5 - Etapas da fabricação do alumínio. Fonte: Kurusu (2009).

2.2.2. Produção de Alumínio

Segundo a MCS (2017), a produção mundial estimada de alumínio refinado (primário) foi de 57,60 milhões de toneladas em 2016, destacando-se a China com 31 milhões de toneladas, seguida da Rússia com 3,58 milhões de toneladas, Canadá, com 3,25 milhões de toneladas, estando o Brasil na décima primeira posição com 790 mil toneladas.

Conforme a Tabela 1, é possível identificar a produção de alumina nos seus principais produtores numa escala dos últimos quatro anos. De 2013 a 2015 a China aumentou sua participação de 46,43% para 54,61%, mantendo quase isto em 2016, considerando-se uma boa estatística em relação a outros países, que apresentam a mesma estabilidade ou queda neste período, como por exemplo, Austrália e Brasil, ambos com grande queda em três anos seguidos e acabaram tendo em 2016 um leve crescimento na produção mundial, assim como Rússia, Grécia e outros países que também apresentaram essa mesma prospecção de queda durante três anos consecutivos e queda em 2016.

Tabela 1 - Produção mundial de alumínio primário (milhões/ton.) Fonte: USGS, 2015 e 2017.

Países	Produção							
	2013	%	2014	%	2015	%	2016	%
Estados Unidos	1,946	4,09	1,720	3,53	1,587	2,76	840	1,45
Argentina	425	0,89	425	0,86		0,00		0,00
Austrália	1,780	3,74	1,680	3,41	1,650	2,87	1,680	2,92
Barém	913	2%	930	1,89	961	1,67	970	1,68
Brasil	1,300	2,73	960	1,97	772	1,34	790	1,37
Canadá	2,970	6,24	2,940	5,96	2,880	5,84	3,250	5,64
China	22,100	46,43	23,300	47,26	31,400	54,61	31,000	53,82
Alemanha	492	1,03	500	1,01		0,00		0,00
Islândia	800	1,68	810	1,64	800	1,39	800	1,38
Índia	1,700	3,571	2,100	4,26	2,360	4,10	2,750	4,77
Moçambique	570	1,19	560	1,13				0,00
Noruega	1,100	2,311	1,200	2,43	1,230	2,14	1,230	2,14
Qatar	600	1,26	610	1,23	610	1,06	640	1,11
Rússia	3,720	7,82	3,500	7,099	3,530	6,14	3,580	6,22
Arábia Saudita	190	0,39	500	1,01	682	1,18	740	1,28
África do Sul	822	1,72	735	1,49	695	1,21	690	1,19
Emirados Árabes	1,860	3,908	2,400	4,87	2,400	4,17	2,400	4,17
Outros	4,290	9,013	4,440	9,01	5,900	11,97	6,240	10,83
Total mundial	47,600	100	49,300	100	57,500	100,00	57,600	100,00

2.2.3. Preços

O Gráfico 1 apresenta uma projeção do preço do alumínio dos últimos quatro anos. É possível observar que em 2013 o preço inicial cotado estava em alta, estimado em US\$ 2039,75 toneladas/métricas segundo a Thomson Reuters Datastream (2017), porém não estabilizando, resultando em quedas ao longo do ano. No início de 2014 em resultado ao ano anterior de quedas o preço é cotado em US\$1.755,25 ascendendo até seu ponto máximo de US\$ 2.098,50 onde a partir daí, sofreu drásticas quedas durante quase todo o período de 2015. Somente a partir de janeiro de 2016 a cotação de preços começou a crescer de maneira lenta, crescendo instavelmente, apresentando diversas quedas aleatórias entre os meses, encerrando o ano em alta em relação a 2015, porém em baixa em relação ao mês anterior.

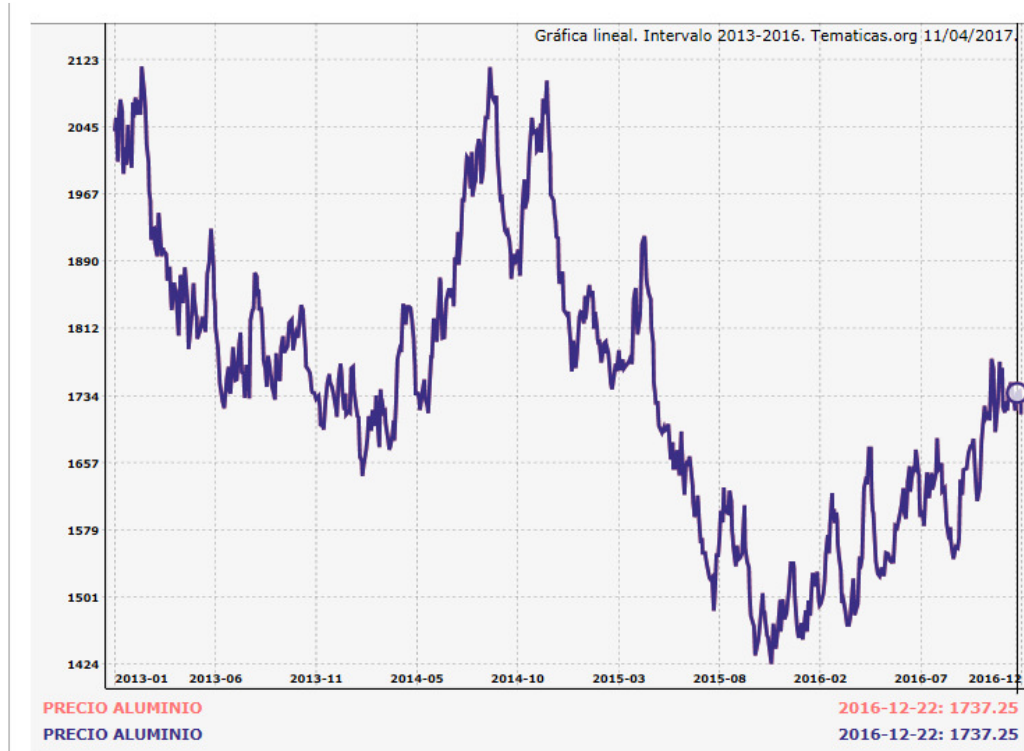


Gráfico 1 - Comparações de preços de mercado do alumínio do período de 2013 a 2016. Fonte: Thomson Reuters Datastream, 2017.

2.3. Bauxita

A bauxita foi descoberta em 1821, pelo geólogo Pierre Berthier, na localidade de Lês Beaux, no sul da França (SAMPAIO et al, 2005). O nome bauxita foi dado por Dufrenoy em 1837, em referência ao local onde foi descoberta a bauxita Beaux, que posteriormente passou a ser Lês Baux, confirmada a existência ali de um depósito cárstico de bauxita (BÁRDOSSY e ALEVA, 1990). Trata-se de uma rocha de coloração avermelhada ou branca, rica em alumínio, com mais de 40% de alumina (Al_2O_3) (SAMPAIO et al, 2005) (BÁRDOSSY e ALEVA, 1990).

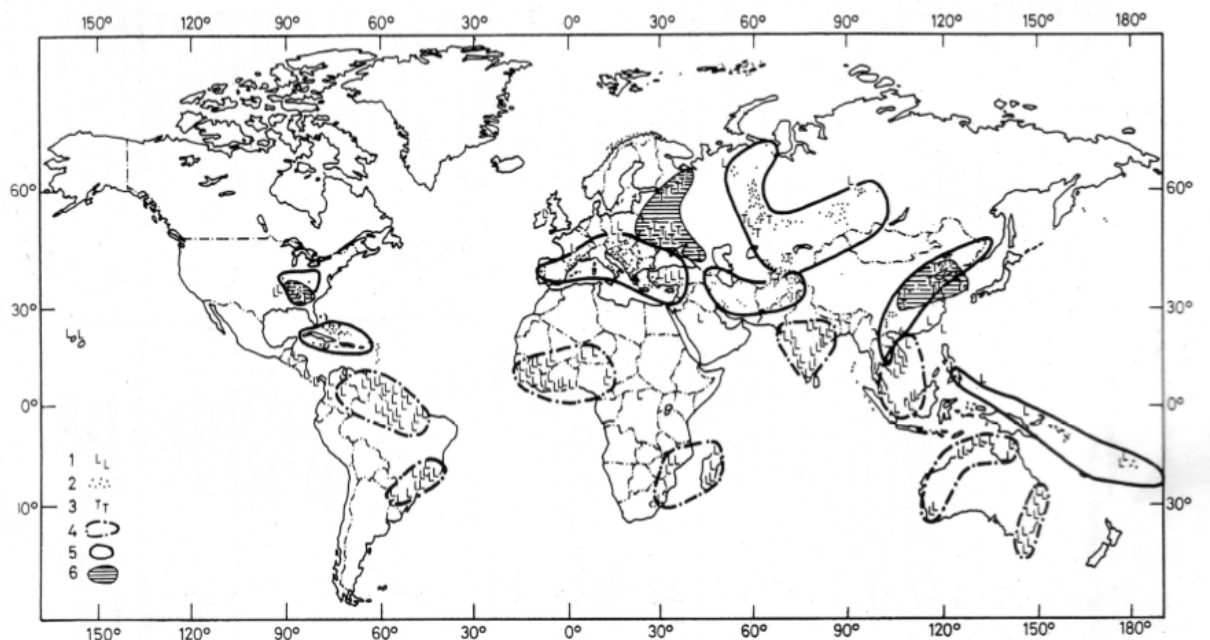
A rocha bauxita compõe - se de uma mistura impura de minerais de alumínio e os mais importantes são gibbsita $Al(OH)_3$, diásporo $AlO(OH)$ e boehmita $AlO(OH)$. Esses minerais são conhecidos como oxi hidróxidos de alumínio e, suas proporções na rocha, variam muito entre os depósitos, bem como o tipo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

Karl Josef Bayer em 1888 patenteou o processo para obtenção da alumina a partir da bauxita, onde se baseia na alta solubilidade de minerais portadores de alumínio em solução de

soda cáustica utilizado no refino da bauxita. Resumindo o esquema do processo Bayer é: digestão, clarificação⁴, precipitação⁵ e calcinação (SILVA FILHO et al, 2007).

Cinco toneladas de bauxita em média precisam ser submetidas ao ataque de 0,14 toneladas de soda cáustica para que possam produzir 2 toneladas de alumina, submetidas a um processo de redução que consome em cerca 13.000 kW produz 1 tonelada de alumínio (MÁRTIRES, 2010).

Segundo Bárdossy e Aleva (1990) há três tipos e depósitos de bauxita no mundo: cársticos, lateríticos e tipo Tikhvin, conforme a Figura 6 que mostra sua distribuição mundial. Os depósitos lateríticos estão na África, Austrália, Brasil, Guina, Índia principalmente.



1: bauxitas lateríticas; 2: bauxitas cársticas; 3: bauxitas tipo Tikhvin-type; 4: províncias lateríticas; 5: províncias cársticas; 6: províncias tipo Tikhvin-type (BÁRDOSSY;ALEVA,1990).

Figura 6 - Distribuição dos depósitos de bauxita no mundo. Fonte: Bárdossy e Aleva (1990).

O processo de laterização tem sua formação resultante pelo intemperismo tropical e paleo tropical a partir de rochas aluminossilicáticas. Os depósitos lateríticos no mundo, especificamente, suas províncias, são vistas na Figura 7.

⁴ Separação da lama vermelha.

⁵ Cristalização do hidróxido de alumínio.

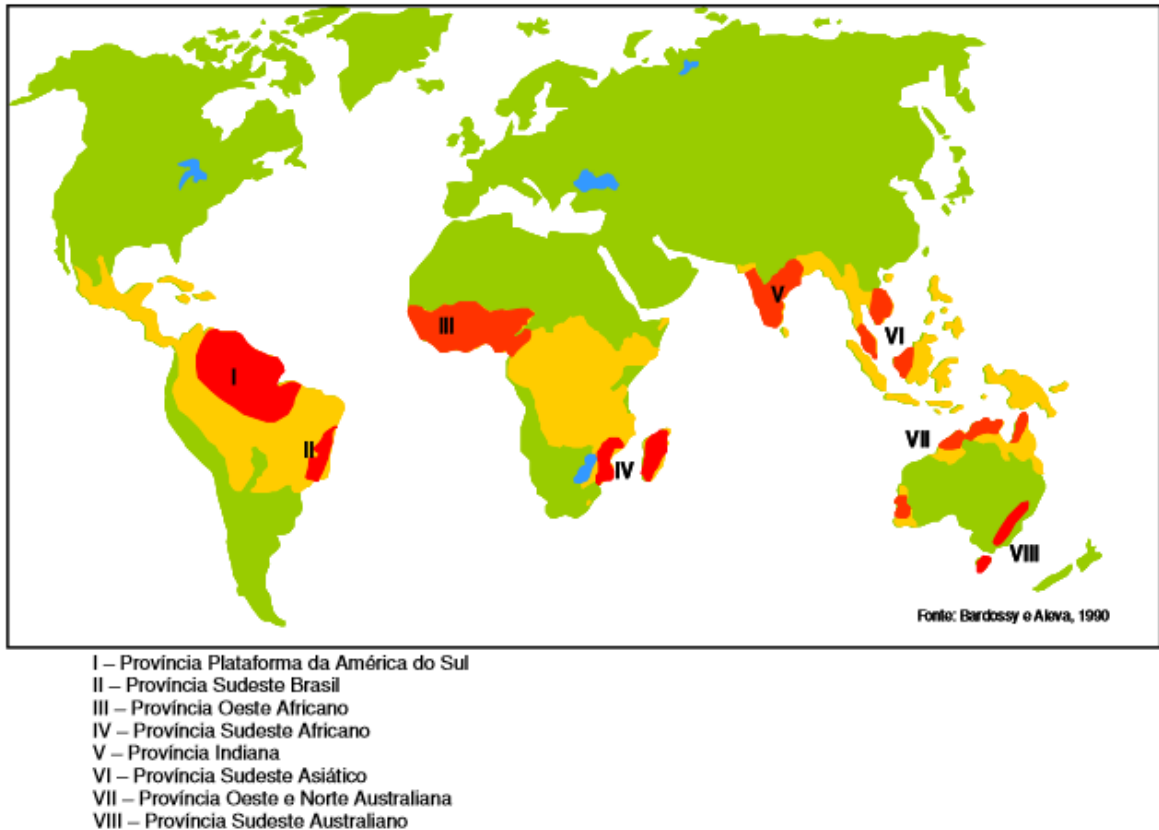


Figura 7 - Províncias de depósitos lateríticos no mundo. Fonte: Bárdossy e Aleva, (1990).

De acordo com o tipo de aplicação a ser utilizada a bauxita é classificada em metalúrgica e não metalúrgica. A metalúrgica é aplicada na obtenção da alumina sendo transformada em alumínio. A bauxita não metalúrgica é principalmente utilizada na indústria de refratários, contudo, sua aplicação se dá em abrasivos, cimentos argilosos, indústria química, antiderrapante, retardador de chama, soldas e etc. (SAMPAIO e NEVES, 2002).

A diferença principal está quimicamente pelo teor de óxido de ferro (Fe_2O_3) que na bauxita metalúrgica chega a 30%, enquanto na não metalúrgica não passa de 5%. No Brasil, 92% da bauxita apresentam altos teores de ferro sendo classificadas como metalúrgica (QUARESMA, 2015).

Na exploração de bauxita no mundo atualmente as maiores empresas são: Comalco, Alcan, Alcoa, Rio Tinto e BHP na Austrália, a CVG na Guiné e a MRN no Brasil. (IBRAM, 2011).

Podem também estar presentes na bauxita além da alumina, outras fases como quartzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3), anatásio (TiO_2) e caulinita ($Al_2Si_2O_5$). Nas amostras desses minérios destacam-se na composição química por apresentar alto teor de alumínio (Al), acompanhado

por ferro (*Fe*), silício (*Si*) e titânio (*Ti*). Em quantidades menores que costumam estarem presentes são Cálcio (*Ca*), Potássio (*K*), Manganês (*Mn*) e Magnésio (*Mg*). Os menos abundantes Boro (*B*), Bário (*Ba*), Berílio (*Be*), Cobalto (*Co*), Cromo (*Cr*), Cobre (*Cu*), Lítio (*Li*), Molibdênio (*Mo*), Chumbo (*Pb*), Estanho (*Sn*), Estrôncio (*Sr*), Vanádio (*V*), Ítrio (*Y*), Zinco (*Zn*) e Zircônio (*Zr*), são considerados elementos traço, ou seja, na escala de parte por milhão (*ppm*) (SILVA e OLIVEIRA, 1992).

Há outros minerais com alto teor de alumínio na natureza, como a alunita ($KAl_3(OH)_6(SO_4)_2$), e anortita ($CaAl_2Si_2O_8$) (SAMPAIO et al, 2005), mas a obtenção de alumínio a partir desses minerais seria muito cara, inviabilizando economicamente o processo.

Estudos recentes com perfis bauxíticos no sudeste do Brasil, mais especificamente Minas Gerais e São Paulo, de Leonardi et al, (2010) incluía possíveis componentes: Pentóxido de Fósforo (P_2O_5), Óxido de Sódio (Na_2O), Gálio (*Ga*), Nióbio (*Nb*), Rubídio (*Rb*), e Tório (*Th*); todos em ppm.

2.3.1. Produção de Bauxita

Existem muitas reservas de bauxita no mundo, as principais estão nas zonas de clima tropical e subtropical. Segundo a MCS (2015) e MCS (2017), as reservas mundiais estavam estimadas por volta dos 28 bilhões de toneladas, além dos recursos mundiais de bauxita que estão entre 55-75 bilhões de toneladas em África (32%), Oceania (23%), América do Sul e Caribe (21%), Ásia (18%), Outros (6%). É relativamente baixo o número de países que produzem bauxita, e mais ainda os que beneficiam o minério.

Tabela 2 - Produção mundial de bauxita (milhões/ton.). Fonte: USGS, 2015 e 2017.

País	Produção							
	2013	%	2014	%	2015	%	2016	%
Brasil	32,500	11,48	32,500	13,89	33,900	11,57	34,500	13,17
Estados Unidos	ND		ND		ND		ND	
Austrália	81,100	28,66	81,000	34,62	80,900	27,61	82,000	31,30
China	46,000	16,25	47,000	20,09	65,000	22,18	65,000	24,81
Grécia	2,100	0,74	2,100	0,90	1,820	0,62	1,800	0,69
Guiné	18,800	6,64	19,300	8,25	18,100	6,18	19,700	7,52
Guiana	1,710	0,60	1,800	0,77	1,700	0,58	1,600	0,61
Índia	15,400	5,44	19,000	8,12	23,800	8,12	25,000	9,54
Indonésia	55,700	19,68	500	0,21	202	0,06	1,000	0,38
Jamaica	9,440	3,34	9,800	4,19	9,630	3,29	8,500	3,24
Cazaquistão	5,400	1,91	5,500	2,35	4,680	1,60	4,600	1,76

Rússia	5,320	1,88	5,300	2,26	5,900	2,01	5,400	2,06
Suriname	2,700	0,95	2,700	1,15	1,600	0,55	ND	
Venezuela	2,160	0,76	2,200	0,94	ND		ND	
Vietnã	250	0,09	1,000	0,43	1,150	0,39	1,500	0,57
Outros	4,570	1,61	4,760	2,03	7,580	2,59	6,860	2,62
Total Mundial	283,000	100	234,000	100	293,000	100	262,000	100

Como é possível visualizar, a Austrália é o maior produtor de bauxita do mundo com 81 milhões de toneladas registradas em 2015 e 82 milhões de toneladas em 2017, seguido de China com 47 e 65 milhões respectivamente. O Brasil ocupa a terceira posição com 32 milhões registrados em 2015 e em 2017 a estimativa foi 34,5 milhões de toneladas.

Em relação a produção nacional, de acordo com DNPM (2015) a estagnação do preço (LME), o custo crescente e a inflação alta, levaram a nova crise, com lucros decrescentes ou agravamento dos prejuízos. Segundo ABAL (2015) a desvalorização cambial não foi suficiente para reverter a situação. Só o Pará produziu 32,2 milhões de toneladas de bauxita, cerca de 90,9% do total nacional, com a MRN liderando com 18 milhões de toneladas, a Norsh Hidro com 9,5 milhões de toneladas e a Alcoa com 4,7 milhões de toneladas (RAL-DNPM, 2015).

A produção de alumina do Brasil em 2014 chegou a atingir 10,4 milhões de toneladas, valor superior ao registrado em 2013 (9,9 milhões de toneladas), com a elevação do preço no mercado externo de US\$1.809,00/tonelada (2013) para US\$2.334,00/tonelada (2014). A produção de metal primário foi de 962 mil toneladas, contra 1.304 mil toneladas em relação ao ano anterior, uma redução de 26,2%. Nessa linha, o metal reciclado teve um acréscimo de 5,88% entre 2013 e 2014, chegando a 540 mil toneladas (ABAL, 2015).

2.3.2. Processo de Formação da Bauxita Amazônica

Depósito mineral é a concentração de elementos químicos e/ou minerais acima do normal da crosta terrestre formado por processos geológicos onde contêm minerais de minério, por exemplo, da bauxita é a alumina (CAVALCANTI e ROCHA, 2010).

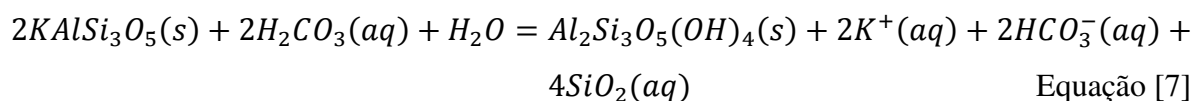
Os depósitos de bauxita da região amazônica são formados a partir de processos superficiais, mais claramente em depósitos residuais. Sendo estes formados por processos intempéricos que atuam transformando ou concentrando minerais, originando assim as jazidas lateríticas (BIONDI, 2004).

O intemperismo apresenta-se de três tipos: físico, biológico ou químico. O intemperismo físico causa a fragmentação da rocha sem causar mudanças químicas ocorridas pelas variações no nível de pressões fadigando o material. O biológico é causado pela ação de vegetais durante a ação desagregadora de ácido húmico, solução resultante da extração de componentes orgânicos do solo ou do subsolo, húmus, por soluções aquosas percolantes. Os químicos por meio das reações químicas resultam na decomposição da estrutura dos minerais. Atuam sobre os minerais constituintes das rochas: dissolução, oxidação, redução, oxirredução, hidratação, lixiviação e troca de íons (LEMES, 2014).

De acordo com Giannini (2000), o intemperismo químico é capaz de concentrar metais; isto ocorre porque todos os principais minerais em rochas ígneas e metamórficas e, certos minerais de rochas sedimentares, são instáveis na superfície da Terra. Estes acabam por alterar-se para novos minerais estáveis. Os mais comuns são os argilo-minerais, um dos principais é a caulinita, onde é acompanhada por vários óxidos e hidróxidos sendo em particular os de ferro, alumínio e titânio o que explica de certa forma a presença desses elementos na bauxita e também no seu rejeito.

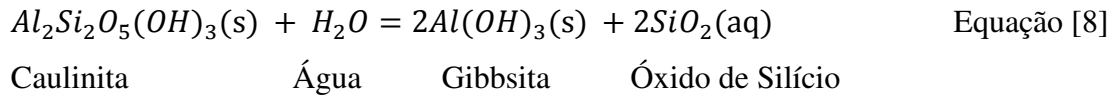
Formada em regiões tropicais e subtropicais por ação do intemperismo químico sobre rochas aluminossilicáticas, apesar da frequência descrita como um minério de alumínio, a bauxita não é um mineral propriamente dito, porém um material heterogêneo formado de mistura de hidróxidos de alumínio hidratados contendo impurezas. As proporções de gibbsita, boehmita e diásporo variam dependendo da localização geográfica do minério (JESUS, 2011).

No Brasil o mineral mais comum na bauxita é a gibbsita. Sua fonte mineral é o feldspato potássio sob a ação da água e do ácido carbônico reagem formando a caulinita, o bicarbonato, a sílica e liberando íons de potássio, como vemos na Equação 7:



Nessa reação o alumínio fica retido nos minerais argilosos residuais e óxidos; está economicamente proibida a extração de alumínio de silicatos, porém em climas tropicais como na Amazônia paraense, a disponibilidade de água permite o desenvolvimento intenso do intemperismo químico, denominando este depósito de residual, pois a sílica é removida da caulinita e um hidróxido de alumínio permanece como resíduo (BIONDI, 2004).

A massa da rocha original em parte é perdida em solução durante o intemperismo, aumentando a concentração de alumínio atingindo no resíduo as quantidades econômicas necessárias; com a caulinita reagindo com a água forma-se a gibbsita e o óxido de silício conforme a equação 8:



Considerando fatores reais, na prática o produto final do intemperismo não é o hidróxido puro, porém uma mistura de óxidos e hidróxidos de alumínio com composição média de $Al(OH)_3$ que é nada mais que a Gibbsita (BIONDI, 2004). As impurezas e suas quantidades presentes na bauxita variam com a região de origem, alterando o aspecto físico do minério, podendo variar de marrom-escuro ferruginoso até cor creme, duro e cristalino (CONSTANTINO et al, 2002).

2.3.3. Importância Econômica

Os maiores produtores mundiais de bauxita registrados em 2016 foram Austrália (31,30%), China (24,81%) e Brasil (13,16%) respectivamente do total de 262.000 milhões de toneladas segundo a MCS (2017). No período de 2016, o Brasil conforme dados do DNPM (2016) produziu uma estimativa de 35 milhões de toneladas sendo contidas aproximadamente 18 milhões de toneladas, 14,9% da produção mundial. As principais empresas produtoras estão distribuídas na Tabela 3.

Tabela 3 - Produção brasileira de Bauxita por empresa. Fonte: DNPM 2016.

ALUMÍNIO (bauxita)			
EMPRESA	UF	PRODUÇÃO (t)	PARTICIPAÇÃO (%)
MRN	PA	16.583.000	47,38
NORSH HYDRO	PA	11.616.500	33,19
ALCOA	PA	4.963.000	14,18
VOTORANTIM – CBA	MG	1.095.500	3,13
MINERADORA SANTO EXPEDITO LTDA	GO	252.000	0,72
HINDALCO	MG	115.500	0,33
OUTRAS	----	374.500	1,07
TOTAL		35.000.000	100

Os dados estão baseados na característica de base úmida necessário para obtenção de alumina, com a finalidade de torná-los comparáveis para as mais diversas fontes. Os números do período de 2016 representam um pequeno crescimento em virtudes das constantes quedas e instabilidades do mercado nos últimos dois anos. Uma das possíveis causas, segundo Santana (2014) para esta estabilidade de produção em 2013 e 2014, é devido ao alto consumo de energia elétrica demanda pelo setor, já que este setor é um grande consumidor de energia para obtenção do alumínio (SANTANA, 2014).

A produção brasileira de alumina em 2013 conforme ABAL (2015) foi de 9,94 milhões de toneladas distribuída por seis grandes empresas do setor Norsh Hydro (Barcarena - PA), Alcoa (São Luís - MA e Poços de Caldas - MG), BHP Billiton (São Luís - MA), Votorantim/CBA (Alumínio - SP), Alcan (São Luís - MA) e Hindalco (Ouro Preto - MG).

Segundo Santana (2014) o Estado do Pará continuou sendo o maior produtor do minério em 2013 e 2014 com mais de 29 e 32,5 milhões de toneladas de bauxita produzidas respectivamente, o que representa 86,5% da produção brasileira. O DNPM (2016) afirma que esta estatística apontando que o Pará foi responsável 94,75% da produção brasileira em 2015. Os três municípios paraenses que produziram o minério foram Oriximiná (MRN), Paragominas (Norsh Hydro Mineração Paragominas) e Juruti (ALCOA).

O projeto Trombetas, da Mineração Rio do Norte, situado no município de Oriximiná no Estado do Pará, em 2014, passou a lavrar bauxita em minas localizadas no município de Terra Santa no Estado do Pará, mas o beneficiamento continua ocorrendo em Porto Trombetas, elevando para quatro o número de municípios produtores do minério de alumínio no Pará.

A bauxita é lavrada no Estado do Pará, além dos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo, Santa Catarina e Goiás. De acordo com o DNPM (2015), a mineração do Pará em 2015, arrecadou de CFEM R\$ 84.675.432,92 sendo o município de Juruti com R\$ 13.610.886,70 o equivalente a quase 16% do total. Quaresma (2009) apresenta que 90% da bauxita comercial é usada para produção metalúrgica do alumínio sendo seus 10% utilizados para fins refratários, abrasivos, cimentos argilosos e etc. Aqui no Brasil esse percentual chega a 95%.

2.4. Lavra de Bauxita na mina de Juruti

Antes de descrever o processo de lavra, devemos conhecer o perfil mineralizado da mina de Juruti. Sendo de origem sedimentar, sua profundidade é de 2,5m a 18,5m possui um corpo mineral com 6m de espessura conforme visualizamos na Figura 8.

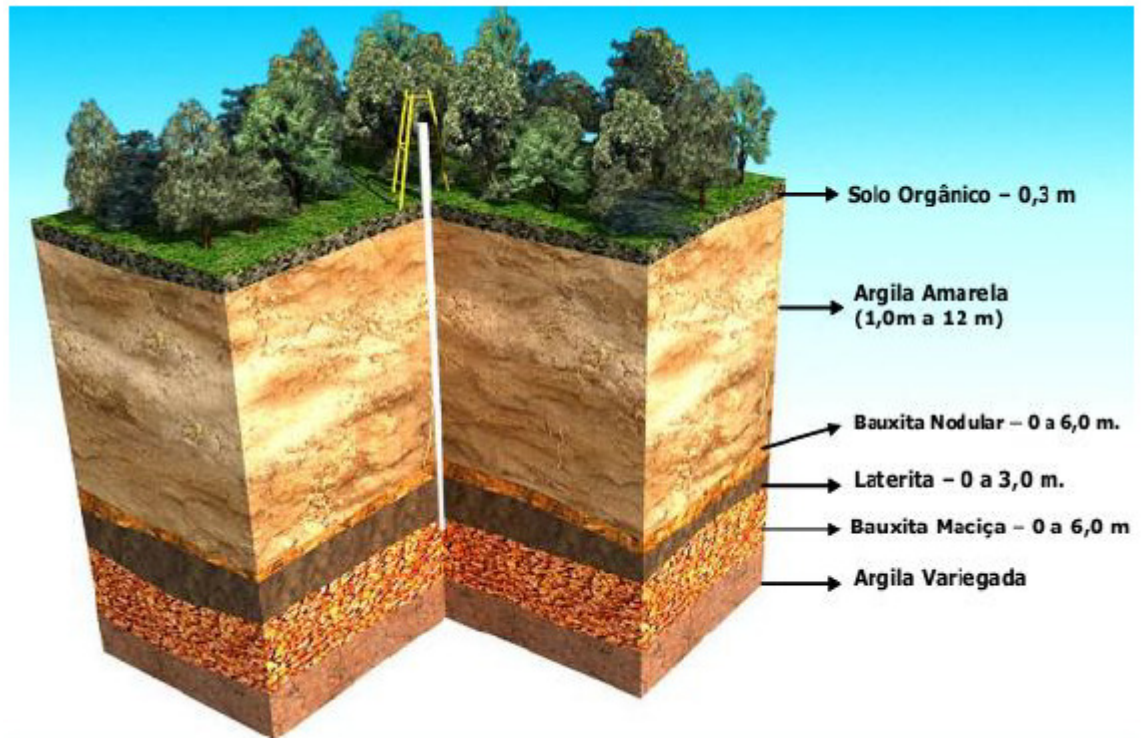


Figura 8 - Perfil da mina de Juruti. Fonte: ALCOA, apud AMARIAL, 2015.

A zona abaixo do solo orgânico possui coloração amarela e argilosa denominada *argila beltterra* formada por caulinita e gibbsita, uma camada permeável e altamente porosa, mesmo sendo argilosa, variando sua espessura de 1 a 12 metros (ALCOA apud AMARAL, 2015).

A zona nodular é composta por estruturas na forma de nódulos entre 0,5 e 12 cm, presos em uma matriz argilosa. Quanto mais profundos estão os nódulos, mais ferruginosos são; sua espessura pode chegar a 3 metros; vem sendo realizados estudos que viabilizam seu potencial econômico para procurar métodos de concentração (BRELAZ, 2013).

A zona laterita ou *bauxita ferruginosa* tem uma coloração escura com elevador teor de ferro; sua espessura é bastante variável podendo ter de centímetros até 3 metros; há nódulos maiores que formam agregados grandes quando são cimentados por óxido de ferro (SOUZA, 2014).

Na bauxita maciça há ocorrência de grandes concentrações de gibbsita, além de óxidos de ferro e caulinita, porém em porções menores; já o quartzo é encontrado próximo à zona ferruginosa, seu topo é mais massivo e contém pouca argila. Segundo Souza (2014) esta zona pode possuir uma espessura de 3,5 a 6,0 metros; quanto maior sua profundidade a zona deixa de ser mais massiva e passa a apresentar-se em blocos. Na zona inferior há a presença de

material argiloso e gibbsita e denomina-se como *argila variegada*, porém esta zona não há importância econômica.

A mina de Juruti apresenta características nos depósitos de bauxita que favorecem a aplicação do método de lavra em tiras ou *strip mining* para o aproveitamento racional de suas reservas (RIMA, 2002).

Conforme descreve Ferreira (2016) a lavra é realizada a céu aberto com a recuperação da área sendo feita de forma contemporânea com a extração do minério, onde a lavra progride por meios de séries de cortes paralelos na forma de trincheiras profundas conforme a Figura 9. A partir da parede lateral da trincheira o material é removido de uma área intacta, depois é reposicionado numa cava lateral em forma de pilhas respeitando o ângulo de repouso conforme a Figura 10.



Figura 9 - Funcionamento da lavra strip mining. Fonte: Souza (2014).



Figura 10 - Tira de bauxita lavrada preparada. Fonte: Brelaz (2013).

Rima (2002) sequencia a lavra da mina de Juruti da seguinte forma:

- Supressão vegetal;

- Remoção do solo orgânico;
- Decapeamento;
- Desmonte mecânico;
- Carregamento;
- Transporte;

A supressão vegetal é o deslocamento de espécies de animais da área que sofrerá retirada da vegetação para outras áreas de vegetação que não serão atingidas, podendo assim evitar a morte destes animais devido ao atropelamento por máquinas e equipamentos (RIMA, 2002). Segundo Ferreira (2016) a supressão realizada na mina em estudo é feita de maneira terceirizada. Inicialmente é realizado o afugentamento, captura de fauna e manejo de flora respectivamente para o possível reflorestamento da área que será minerada. Normalmente este tipo de atividade é realizada com motosserra, onde seus operadores são encarregados pelos cortes de médio e grande porte das árvores (aproximadamente com um diâmetro de 80 cm) retalhando-as em formas de toras. Um exemplo é apresentado na Figura 11 (FERREIRA 2016).



Figura 11 - Supressão vegetal com motosserras. Fonte: TopGeobr, 2016.

Para limpeza da área são utilizados tratores de esteiras D61 da Komatsu e escavadeiras para auxiliar o carregamento aos caminhões transportadores para os depósitos de estéril localizados estrategicamente para reconformação das áreas degradadas pela lavra. Souza (2014) também afirma que na mina de Juruti essas galhadas são depositadas ao fundo das cavas justamente para auxiliar na vegetação de áreas já lavradas. As toras de madeiras presentes no local são transportadas pelas carregadoras modelo WA200 Komatsu e caminhões Mercedes Bens modelo 2425, onde são agrupadas e direcionadas aos órgãos competentes.

Segundo o Rima (2002) a remoção do solo orgânico é a retirada da camada vegetal da terra ou a primeira camada do solo até a profundidade indicada em um projeto, sendo ele alocado em lugares apropriados para posterior utilização. Conforme Amaral (2015) na mina de Juruti, esta fase compreende a retirada da primeira camada que apresenta uma coloração escura com aproximadamente 30 cm de espessura rica em nutrientes - o *Topsoil*⁶, onde há utilização de escavadeiras do tipo PC400 e caminhões basculantes tipo P420. Na Figura 12 visualizamos a realização do procedimento desta fase (RIMA, 2002) (AMARAL, 2015).



Figura 12 - Realização da retirada e carregamento de topsoil. Fonte: Amaral (2015).

O decapeamento é a remoção da camada de estéril do solo podendo variar entre 10 a 12 m de espessura. Segundo Amaral (2015) a remoção desse estéril na mina é realizada com tratores de esteiras. Após a remoção da camada de laterita, esta é empurrada para uma área fora onde se faz utilização na construção, conformação e manutenção de vias principais servindo para o tráfego de veículos (AMARAL, 2015).

Já o desmonte mecânico é realizado também com tratores acoplados com um dispositivo, o “ripper”, com o formato de um gancho que em contato com a rocha a fragmenta, processo denominado *escarificação*. Geralmente as tiras possuem as medidas de 200 metros comprimento e 25 de largura, constituídas de 7 a 8 blocos de 25x25m. Possuem um padrão de nomenclatura alfabética que pela topografia local são demarcadas com bandeiras numeradas e estacas (AMARAL, 2015).

⁶ É uma camada superficial do solo, que contém altas concentrações de matéria orgânica e microorganismos (MARSH, 2010).



Figura 13 - Processo de desmonte da camada de bauxita. Fonte: Amaral (2015).

O carregamento e transporte são a última etapa na lavra, esse trabalho é realizado por escavadeiras e caminhões equipamentos de porte médio para designar o material ao seu destino. O minério sai das frentes de lavra e segue até o britador localizado na planta de beneficiamento (AMARAL, 2015).

2.5. Beneficiamento na mina de Juruti

Citado antes, o beneficiamento do minério é realizado por etapas: britagem, lavagem *scruber*, peneiras *trommel* e classificação granulométrica com peneiras vibratórias “*sprays*” em duas linhas paralelas.

A britagem é dividida em dois britadores – principal e secundário. O material é basculhado na moega onde o alimentador de sapatas transporta a bauxita até o britador primário, com *topsize* de 1200 mm, com saída de alimentação para o britador secundário de 340 mm, reduzindo o minério até 130 mm. Saindo do britador secundário, alimenta o circuito de transportadores, que inicia pela correia de sacrifício suportando a queda por gravidade do material. A correia transportadora conduz às empilhadeiras para a homogeneização garantindo a mistura de teores do minério estocado no pátio de bauxita britada (FERREIRA, 2016).

Para a lavagem o minério é processado no conjunto lavagem e peneiras (*scruber/trommel*) do qual o tambor de escrubagem tem a função de desagregar a argila da bauxita; isso ocorre através das aletas encontradas no interior do *scruber* no qual está acoplado a ele o *trommel*⁷.

⁷ Peneira rotativa, que atua na separação por tamanho de partículas por telas de aço com malhas de 4, 3 e 2 polegadas.

O que é retido nas peneiras segue para o pátio de produtos. As frações mais finas seguem em forma de polpa para baterias de hidrociclones. As frações menores que 400 mesh são considerados rejeitos e seguem para tubulações para lagos ou reservatórios de rejeito. Na Figura 14 conseguimos compreender mais claramente os processos a partir do fluxograma onde mostra suas operações unitárias.

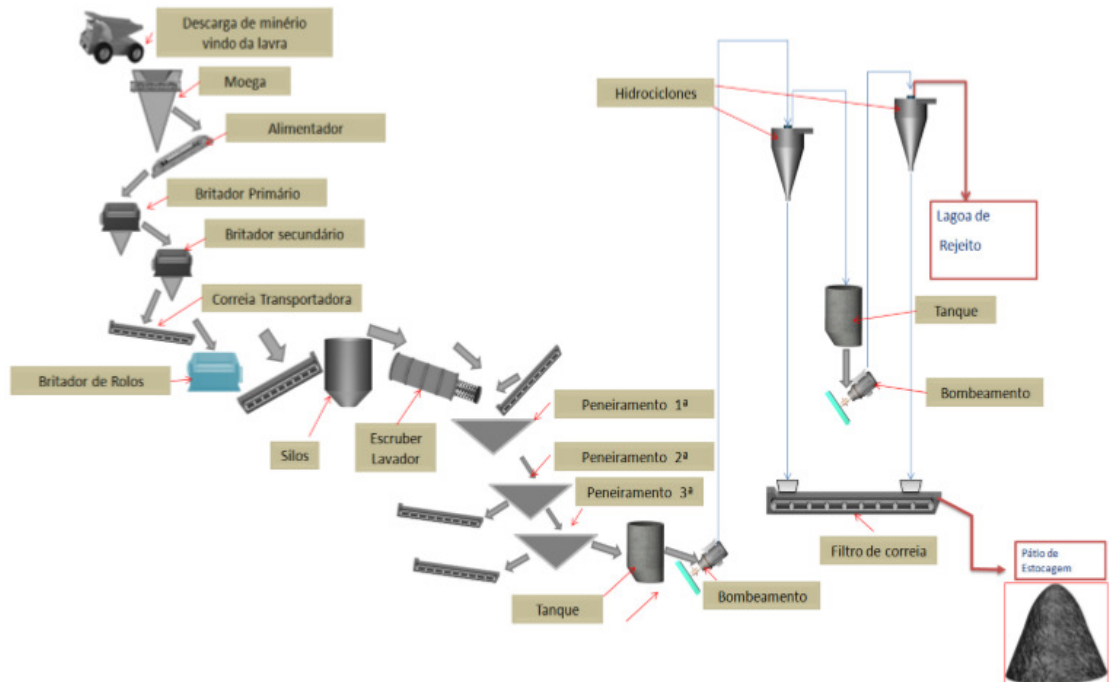


Figura 14 - Fluxograma do beneficiamento de bauxita. Fonte: ALCOA apud BATISTA, 2014.

2.6. Barragem de Rejeito

Visto anteriormente, materiais com granulometria menor 400 mesh que saem do *overflow*⁸ das baterias de ciclones seguem por uma tubulação com destino ao reservatório ou bacia de rejeito. A lagoa de sedimentação é o primeiro destino, sendo impermeabilizada quase que completamente nas laterais, quanto no fundo, e tem como objetivo sedimentar naturalmente no fundo a polpa que chega com o teor de sólido variando de 5 a 8%, conforme a Figura 15. Logo em seguida passa-se para a drenagem - um estágio intermediário entre a lagoa de sedimentos e a barragem, onde o rejeito sedimentado é encaminhado para a barragem de rejeito. As dragas de sucção - equipamento realizado para fazer este procedimento – flutuam numa lâmina d'água, e conduzem o material da lagoa de sedimentação para a barragem de rejeito que está situada ao lado desta lagoa, no qual a polpa transferida já está num percentual entre 28 a 30%.

⁸ Transbordar



Figura 15 - Lagoa de Sedimentação. Fonte: Brelaz, 2013.

A barragem de rejeito é semelhante a estrutura da lagoa, porém só possui impermeabilidade nas laterais permitindo que o solo filtre parte da água, pois o objetivo é o rejeito armazenado, parte dessa quantidade de água é retornada para a lagoa pelo transbordo⁹. O restante é evaporado simplesmente e deixado as partículas sólidas, assim dentro de um determinado tempo ficará cheio de material necessitando uma nova área para destinação.



Figura 16 - Barragem de rejeito Votorantim Metais. Fonte: Votorantim, 2016.

⁹ É a passagem de um material seja ele líquido ou sólido de um local para o mesmo tipo de local só que em lugares diferentes.

Segundo Ferreira (2016) a barragem de rejeito em Juruti recebeu uma nova barragem em relação da primeira barragem. Esta possui um sistema de circuito fechado para alimentar a planta de beneficiamento de recuperação de água: a lagoa recebe água drenada da barragem de rejeito e a água nova da base Capiranga no rio Juruti Velho. Aqui a água da polpa é circulada no processo de lavagem com um reaproveitamento de 85% capitando apenas 15%.

Nos últimos anos o controle e monitoramento das barragens têm sido mais rigorosos, mesmo assim ainda tem ocorrido diversos acidentes com grandes impactos. Em 2006 na cidade de Miraf em Minas Gerais a barragem de rejeito de lavagem de bauxita da mineração Rio Pomba Cataguases rompeu-se despejando 400 milhões de m³ de *polpa* de rejeito no rio Fubá, conforme a Figura 17. Após o primeiro incidente, a barragem voltou a se romper com 2 bilhões de metros de lama atingindo dois outros municípios do estado e mais quatro municípios do Estado do Rio de Janeiro. A mineradora foi multada em 75 milhões de reais, além de arcar com custos da recuperação das áreas atingidas e indenizações aos moradores. A empresa afirmou que o acidente foi devido ao excesso de chuvas, porém o governo interditou a empresa por tempo indeterminado (CETEM, 2015).



Figura 17 - Rompimento de barragem atingindo o Rio Fubá e depois o rio Muriaé. Fonte: Axel Graef, 2007.

Em 2015 um dos maiores desastres industriais envolvendo barragem ocorreu no município de Mariana no Estado de Minas Gerais. O rompimento das barragens de rejeitos de Fundão e Santarém, controladas pela Samarco Mineração S.A., em conjunto com uma das maiores empresas de mineração do mundo, a brasileira Vale S.A. e a anglo australiana BHP Billiton causou o maior impacto ambiental da história brasileira e o maior do mundo envolvendo barragem de rejeito, com um volume despejado de 62 milhões de m³. A lama chegou ao Rio Doce, cuja bacia hidrográfica abrange 230 municípios dos Estados de Minas

Gerais e Espírito Santo, muitos dos quais abastecem sua população com a água do rio. Na apuração das causas o resultado foi descrito que não havia sido um acidente nem uma fatalidade e sim um erro na operação e negligência no monitoramento (BRANCO; VILLELA, 2016).



Figura 18 - Rompimento da barragem de Fundão. Fonte: Rogério Alves, 2015.

2.7. Caracterização Mineralógica

Dada à complexidade dos minérios, tanto física quanto química, os estudos relativos à caracterização antecedem o desenvolvimento de seus processos de concentração. Segundo Nuemann et al, (2010) a caracterização de minérios é fundamental para o aproveitamento de qualquer recurso natural existente de maneira melhorada. Além de identificar e quantificar todo agrupamento mineralógico, define quais minerais interessam e suas respectivas gangas e quantifica a distribuição dos minerais (NUEMANN et al, 2010). O que acaba determinando a dimensão das partículas necessárias para a liberação dos minerais de interesse de ganga, definindo diversificadas propriedades físicas e químicas gerando informações com potencial para auxílio na definição das rotas de processamento.

É importante frisar que as informações que são coletas nos estudos mineralógicos aplicadas ao beneficiamento não se limitam apenas a identificação das amostras, mas contribuem para a avaliação dos constituintes de forma qualitativa, quantitativa e semiquantitativa (CETEM, 2010).

Levando em consideração a variedade dos tipos de minério e/ou a diversificação de produtos obtidos através de certos processos de concentração, determinados itens devem ser levados em consideração, pois são essenciais na caracterização aplicados ao processo de

beneficiamento. Os processos de beneficiamento utilizam diversas etapas e operações da caracterização mineralógica de um minério, as principais são representadas na Figura 19.

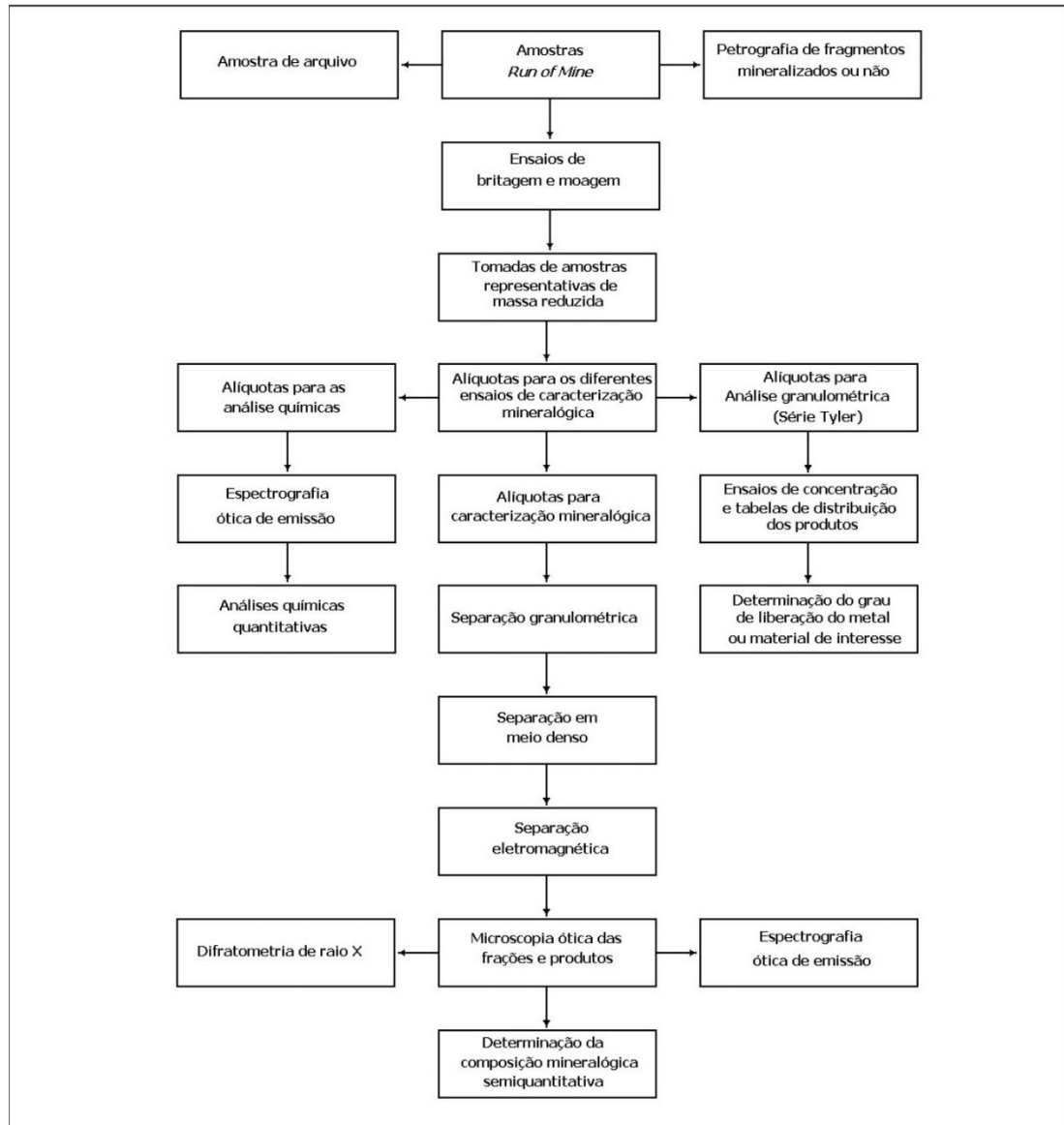


Figura 19 - Principais etapas da caracterização mineralógica de um minério. Fonte: CETEM, 2004.

Geralmente as informações obtidas na caracterização permite:

- Desenvolver fluxogramas sugerindo tipos de ensaios de concentrações;
- Compreender o comportamento do mineral em um determinado processo de beneficiamento e/ou metalúrgico;
- Determinar a qualidade obtida em diferentes ensaios, através das identificações mineralógicas dos concentrados e rejeitos;
- Avaliar concentrados conforme seu grau de seletividade;

- Complementar os estudos partindo de diferentes tipologias de minério, segundo identificação de diferentes amostras relativas à lavra.

2.7.1. Identificação dos Minerais

A identificação de minério e de ganga numa amostra e a sua quantificação são englobadas na caracterização mineralógica. A identificação é baseada nas propriedades que os define como a composição química e propriedades físicas.

A caracterização normalmente é trabalhada em escala microscópica, porém muitas vezes é utilizada a escala mesoscópica e suas observações são muito uteis, permitindo identificar parte dos minerais mais importantes. Na escala microscópica os métodos mais empregados na identificação são as microscopias óptica (lupa, microscópio estereoscópico, microscópio petrográfico de luz transmitida e de luz refletida) e eletrônica, e a difração de raios X (SCHENEIDER et al, 2001).

As análises em microscópio, estereoscópio e/ou lupa são praticamente padrão em análises preliminares para identificação comuns de minerais, avaliação de tamanho e estimativa de liberação. Por exemplo, em minerais pesados como areia de praias, a caracterização pode ser feita exclusivamente através destes equipamentos, uma vez que estes cristais são limpos, grandes e bem liberados assegurando a identificação. Quando associado a fracionamentos magnéticos e eletrostáticos a quantificação dos minerais referente a cada produto é bastante eficaz. Comprovadamente, esta associação também é imprescindível na identificação qualitativa e fundamental na identificação de fragmentos metálicos (CETEM, 2004).

Para os métodos de identificação de minerais transparentes e opacos, as microscopias ópticas através de luz transmitida e refletida são as mais tradicionais. Ambas têm como base a interação da luz (branca, do espectro visível), e são bastante flexíveis e precisos nas análises qualitativas, geralmente estas análises exigem uma preparação diferenciada em várias secções: delgadas, polidas e polidas delgadas, e utilizam a luz transmitida, refletida e ambas (SCHENEIDER et al, 2004).

Segundo Nuemann et al, (2010) através da microscopia óptica pode-se obter:

- Análise mineralógica qualitativa que identifica os minerais;
- Análise mineralógica semiquantitativa por meio de avaliações e cálculos semiquantitativos das proporções percentuais de todos os minerais do minério;
- Determinação do grau de liberdade através dos cálculos de porcentagem de liberação em relação à ganga;

- Refletividade medida de minerais opacos;
- Fotomicrografias de determinados fenômenos relativos à formação do mineral do minério;

2.7.2. Análise Mineralógica Qualitativa

Esta análise baseia-se em essência na identificação das principais propriedades ópticas dos minerais. Devido ao tipo de matéria constituinte no minério, dá-se uma maior ênfase no estudo realizado no microscópio. Mesmo que em caráter exploratório, este tipo de estudo proporciona uma visualização real do comportamento destes constituintes, independente se o mineral possui grande valor monetário ou formador de ganga (CETEM, 2010).

Segundo as descrições de Kerr (1959), Parfenoff et al, (1970), Deer et al, (1984) e Klein e Hurlbut (1993), nos minerais transparentes as propriedades consideradas fundamentais para identificação são: birrefringência¹⁰, cor, determinação do sinal óptico, figuras de interferência, forma, extinção, geminações, planos de clivagens e de fraturas, pleocroísmo¹¹ e relevo. Já nos minerais opacos segundo Uytenbogaard e Burke (1985), Edwards (1974) e Picot e Johan (1977) são principalmente: anisotropismo, cor, forma, isotropismo¹², pleocroísmo e reflectância (CETEM, 2010).

2.8. Técnicas de Caracterização

2.8.1. Difractometria de Raios X

Radiações eletromagnéticas com comprimento de onda estendidas de 10^3 a 10^5 Å polarizadas, refletidas ou difratadas são conhecidas como raio X. A dispersão dos raios X pelos elétrons dos átomos do cristal resulta no feixe difratado sem mudança no comprimento de onda, a qual é descrita pela equação de Bragg:

$$(n\lambda = 2d \sin \theta) \quad \text{Equação [10]}$$

Onde:

- λ - Comprimento de onda dos raios atômicos no retículo difratados;
- d - Distância dos átomos ou da rede de planos cristalino;
- n - Número inteiro correspondente à ordem de difração;
- θ - Ângulo oblíquo ou ângulo de Bragg;

¹⁰ Criação de dois raios refratados a partir de um único raio inicial.

¹¹ Fenômeno óptico no qual grãos minerais de uma rocha apresentam diferentes cores quando observados segundo ângulos diferentes.

¹² Qualidade de apresentar as mesmas condições homogêneas de intensidade, variação, brilho e etc., em todas as direções.

Portanto, cada substância tem um padrão de difração único e próprio. Os diversos padrões dos materiais são registrados em bancos de dados que podem ser acessados de maneira gratuita ou a partir de aquisição de licenças comerciais. Um dos mais utilizados é a do ICDD (KLUG E ALEXANDER, 1966) (CULLITY, 1978).

A DRX é uma ferramenta básica para a caracterização mineralógica de minérios. A base do método é a interação de ondas na frequência de raios X variando de 0,70 e 2,30 Å com planos de repetição do retículo cristalino como na Figura 23, aplicando-se, pela própria definição, apenas em materiais cristalinos e não em amorfos.

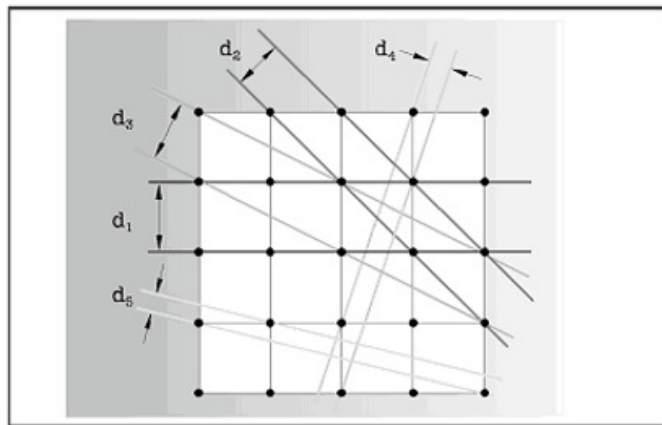


Figura 20 - Corte num retículo cúbico esquemático e representação de diversos planos de repetição sistemática detectados por DRX. Fonte: Bruker AXS, Inc., 2010).

Conforme Luz et al, (2010) os feixes de raios X são produzidos acelerados por alta tensão, pelo bombardeio de anodos por elétrons do catodo. Em cada plano cristalino difratado, a incidência na amostra do feixe monocromático provoca uma interferência construtiva, que pelo contador de radiação é detectada e traduzida em um sinal eletrônico para um registrador. A análise do material pode ser um simples cristal como na Figura 24 ou substâncias mono ou policristalina na forma de pó, sendo o método de pó mais utilizado, já que a câmara de Debye-Scherrer foi substituída pelo difratômetro. A técnica de DRX requer uma quantidade de amostra de menos que 1g, além de possuir baixo custo operacional é rápida quanto está automatizada.

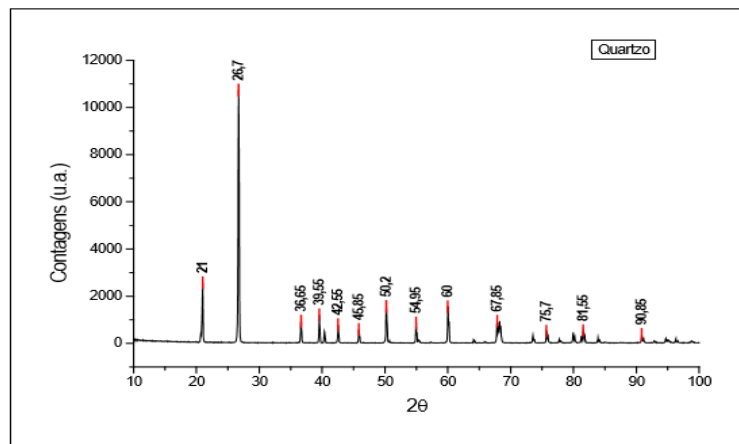


Figura 21 - Exemplo de DRX do quartzo. Fonte: Luz et al, (2010).

Como já referido, o método do pó vem sendo mais utilizado. Na Figura 25 temos a configuração mais básica para um difratômetro de raios X. Existem diversas variações que melhoram sua intensidade, podem reduzir ruídos na preparação de amostras, a radiação torna-se mais limpa, e os dados são mais precisos. Comumente na configuração conhecida como $\theta/2\theta$, a amostra move-se numa velocidade angular θ , e o detector no dobro, detectando as contagens refletidas no plano da amostra. A leitura realizada são as contagens das reflexões em determinado ângulo θ , convertido para distâncias interplanares d pela equação de Bragg, já citada. Qualquer má execução na preparação da amostra que perturbe esta geometria resulta em erros de leitura do ângulo.

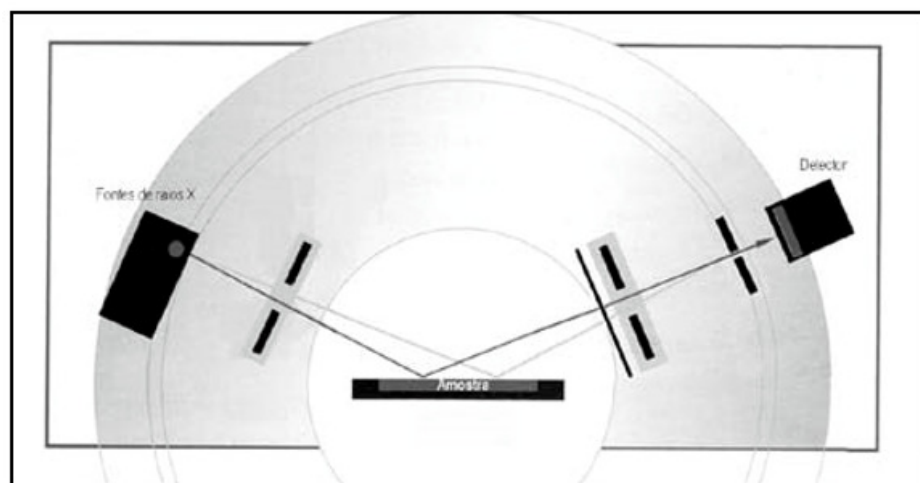


Figura 22 - Esquematização de um difratômetro de raios X para método de pó. Fonte: Bruker AXS, Inc).

A posição dos picos (ângulo θ) calculados pela Lei de Bragg de determinado mineral teoricamente não deveria mudar, porém na prática pode haver pequenos desvios justamente pela variação na sua composição. Isto, portanto faz da DRX uma ferramenta muito precisa na identificação das fases cristalinas.

Por isso, a DRX não se aplica somente na identificação de 95% das substâncias inorgânicas, mas também para identificação de estruturas cristalinas, como por exemplo, a indicação dos planos cristalinos e determinação de parâmetros unitários, onde esta indicação refere-se à localização das posições das fases dos cristais ou planos cristalinos das várias reflexões. Valores quantitativos das fases, dependendo do material podem ser obtidos de acordo com o método apropriado. A DRX também é bastante aplicada para investigar argilominerais, pois devido à granulometria natural baixa (menor que 2 μ m) deste tipo de minerais. Além de ser utilizada para determinar a composição de soluções sólidas, séries isomórficas de olivinas, piroxênios e plagioclásios (LUZ et al, 2010).

2.8.2. Espectrometria de Fluorescência de Raios X

Na fluorescência de raios X, o processo de excitação da amostra deve-se à irradiação por um feixe primário resultante da produção de uma radiação secundária devido à característica dos elementos químicos presentes. A fluorescência de raios X, ao longo dos últimos anos, tornou-se uma técnica universal de análise de materiais; conhecendo os ângulos de reflexão e a intensidade da radiação, é possível identificar os elementos assim como proceder à quantificação (DUTRA e GOMES, 1984).

Em virtude da simplicidade do espectro, as análises qualitativas são geralmente fáceis e confiáveis. Na simples comparação das alturas dos picos com os espectros padrão pode-se realizar a análise semiquantitativa. Já a análise quantitativa consiste na medida das linhas do espectro bem característico dos elementos procurados e a relação dessas intensidades com sua concentração na matriz onde estão dispersos (LUZ et al, 2010).

A EFRX é uma das técnicas instrumentais mais versáteis, segundo Luz et al, (2010) permite a análise de amostras sob a forma líquida ou sólida. Possui ampla capacidade de detecção que abrange elementos nos quais a espectrografia óptica de emissão se mostra ineficiente como por exemplo: *S, Cl, As, Se, Br, I, Ta e Th*.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

As obtenções das amostras foram coletadas no município de Juruti (02° 09' 09" S e 56° 05' 42" W Gr), localizado no extremo oeste do Estado do Pará, limitando-se com os municípios de Oriximiná e Óbidos ao norte, Santarém ao leste, Aveiro ao sul e Parintins e Terra Santa ao oeste, sendo Parintins divisa para outro estado, como na Figura 26.



Figura 23 - Localização geográfica do município de Juruti. Fonte: Google Maps, 2016.

A cidade está a 855 Km (em linha reta) distante de Belém, capital do Estado do Pará, e a 450 Km de Manaus, capital do Estado do Amazonas. Possui uma área de 8.306,298 Km² (PJM, 2015). A população do município é de 47.086 habitantes de acordo com o censo 2010, com uma estimativa de 53.989 habitantes em 2015, o que corresponde a uma densidade de 6,5 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2016).

3.2. Coleta das Amostras

Antes da coleta das amostras para a caracterização mineral observamos os processos desde a extração da bauxita até a obtenção e destinação final do rejeito, caso houvesse possíveis fatores para alteração nos resultados. Encaminhou-se um ofício para o setor de processos e controle de qualidade da mina para solicitação dessas amostras de rejeito, as amostras foram coletadas na polpa da lavagem da mina antes de ser levada para a bacia de rejeitos onde alguns de seus componentes podiam ser removidos por lixiviação. A usina da mina da Alcoa opera em duas linhas de produção, dessa forma, o rejeito foi coletado em conjunto em 12 litros encaminhadas primeiro ao laboratório da própria Alcoa.

Para a retirada de excesso de água a amostra foi decantada, precavendo-se para não se removerem os sólidos, depois posta em estufa a 120°C num período de 12 horas. No protocolo adotado pela Alcoa para retirada da umidade, o aquecimento ocorre a 120°C, em protocolos normais usa-se 105°C, para evitar oxidação devido aos minerais principalmente de ferro presentes na amostra.

Com o material já seco, as amostras que foram coletadas a cada 15 dias, foram embaladas em aproximadamente 500g, no período de novembro de 2014 a janeiro de 2015 em

sacos de amostra de 1 kg, identificados e entregues por um supervisor da Alcoa. As amostras foram homogeneizadas e quarteadas usando o quarteado Jones até $\frac{1}{4}$ do volume inicial. A cada uma das 6 amostras quarteadas, duas foram retiradas em cápsulas de 1g, para a EFRX outra para o DRX, num total de 12 cápsulas; para a EFRX as amostras foram identificadas e encaminhadas via correio postal para o Laboratório de Raios X do Departamento de Física da UFC, as amostras para DRX foram realizadas no Laboratório de Síntese e Caracterização de Novos Materiais na UFOPA.

3.3. Equipamentos

Para a caracterização mineralógica dos rejeitos em DRX utilizou-se um difratômetro de raios X, modelo D2Phaser da Bruker, a realização das medidas de DRX foi através do método do pó, num período de 1000 segundos (equivalente a 16 min e 40 s), em temperatura ambiente (25°C), extensão (2θ): 3° a 100°; 2,0°/min; radiação CuK α ; 30 kV; 40 mA; sendo realizada no laboratório de Espectroscopia de Síntese e Caracterização de Materiais, da UFOPA.

Quanto aos elementos quantitativos das amostras, para determiná-los usou-se a técnica analítica EFRX. Sabemos que os constituintes da bauxita e que determinam sua qualidade são as quantidades de alumínio e sílica reativa que são determinados de maneira geral pelo processo de Bayer, porém temos interesse neste caso, em analisar quais são os outros elementos presentes no rejeito e o seu teor. O equipamento utilizado foi o espectrômetro da Rigaku, modelo ZSX-Mini II. Em pastilhas fundidas preparadas a partir da fusão de 1,0 g de amostra pulverizada com 7,0 g de tetraborato de lítio, os teores dos elementos foram detectados.

Para a dosagem dos elementos presentes nas amostras as condições analíticas aplicadas foram detectores selado e de fluxo, cristais analisadores Ge, LIF200, PET, PX1 e PX3; a potência do tubo estava a 24 kV e 90 mA ou 50 kV e 50 mA, na análise quantitativa foi o software *SemiQ*, desenvolvido pela Philips utilizado para realizar esta análise, esta etapa foi realizada no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da UFC.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Difractometria de Raios X

A Figura 27 mostra os difratogramas gerados pelas seis amostras:

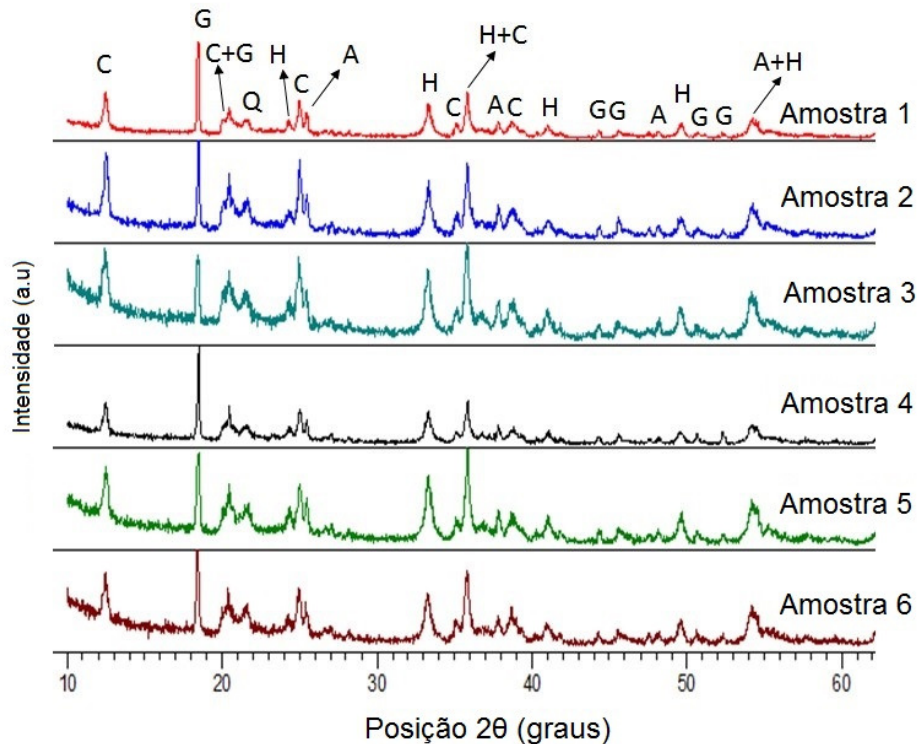


Figura 24 - Identificação dos picos das amostras coletadas em diferentes regiões da polpa. Fonte: Autor, 2016.

Verificamos a identificação de 18 picos no difratograma. Sendo estas as cinco fases mineralógicas mais abundantemente presente nas amostras de rejeito da mina de Juruti coletadas. Assim, os principais minerais encontrados no rejeito da bauxita são:

- G= Gibbsita: $Al_2(OH)_3$; (02)
- H= Hematita: Fe_2O_3 ; (06)
- C= Caulinita: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$; (04)
- A= Anatásio: TiO_2 ; (01)
- Q= Quartzo: SiO_2 ; (01)

Nos difratogramas acima percebe-se que o maior pico registrado foi para a gibbsita, seguidos de hematita, assim como a caulinita que também apresenta vários picos, enquanto o anatásio e quartzo são claramente as fases minoritárias registradas com os picos mais baixos no difratograma acima. Na utilização de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foram encontraram seis fases minerais em estudos preliminares de caracterização com rejeitos de bauxita da mina de Juruti por Pontes, Santos e Figueira (2015).

Arenare (2009) usando a DRX identificou na bauxita (*in natura*) de Juruti: sete fases minerais: gibbsita, caulinita, hematita, goethita, magnetita, anatásio e boehmita; goethita,

magnetita e boehmita não foram encontradas no rejeito estudado neste trabalho. Sendo assim consta-se que no rejeito da bauxita, tal qual a própria bauxita, apresenta grande fração gibbsitíca $Al_2(OH)_3$, associada aos minerais de caulinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ e hematita Fe_2O_3 , contendo uma pequena quantidade de anatásio TiO_2 e quartzo SiO_2 .

Os compostos de ferro (hematita) e titânio (anatásio) encontrados na bauxita são geralmente insolúveis em soluções básicas e têm pouco efeito na extração seletiva do alumínio. A sílica que se dissolve no processo de Bayer é fornecida pela caulinita e não pelo quartzo, sendo conhecida como sílica reativa, sendo esta questão um desafio para importante na produção de alumínio; estes compostos de silício são rapidamente dissolvidos na etapa de digestão do minério. A presença de sílica na bauxita pode causar problemas na sua digestão, entre eles, o consumo de $NaOH$, devido à dissolução e reprecipitação da sílica como um complexo de aluminossilicatos de sódio e a formação de incrustações especialmente em superfícies trocadoras de calor (JESUS, 2011).

A utilização da separação magnética nos rejeitos de bauxita foi proposta por Kurusu (2009), onde a fração magnética, composta dos minerais de titânio e ferro, poderia ser usada como aditivo para a fabricação de cimento Portland, enquanto a fração não magnética, composta por minerais de silício, poderia substituir a areia na construção civil (KURUSU, 2009). A possível aplicação dos rejeitos da indústria de alumina como incremento ao cimento já foi constatada em estudos anteriores, além de diversas pesquisas sobre resíduos de bauxita, porém em sua grande maioria utilizam o rejeito advindo do processo de Bayer – a lama vermelha.

Surge a proposta de aplicação do rejeito de bauxita da mina de Juruti por exemplo na composição do concreto como sugerido por Ferreira (2016), visto que a hematita possui alto teor de ferro tendo dureza entre 6 e 6,5; e o anatásio com alto teor de titânio e dureza na faixa de 5,5 a 6, sendo capazes de proporcionar maior resistência ao concreto, e também podendo ser aplicado nos tijolos ecológicos, já que possui uma quantidade considerável silício conforme os dados registrados no DRX.

4.2. Espectrometria de Fluorescência de Raios X

Os espectrogramas gerados pelas amostras são bastante relevantes para demonstrar qualitativamente os principais elementos químicos constituintes do rejeito de bauxita. O resultado laboratorial possibilitou a elaboração da tabela seguinte, com base na espectrometria de FRX.

Tabela 4 - Resultados da EFRX. Fonte: Autor, 2016.

Óxidos	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Amostra 3 (%)	Amostra 4 (%)	Amostra 5 (%)	Amostra 6 (%)	Média (%)
Fe₂O₃	66,223	57,912	65,232	61,002	63,153	63,192	62,786
SiO₂	13,747	16,816	14,931	16,175	14,725	14,523	15,153
Al₂O₃	11,762	16,374	12,646	14,664	14,25	14,438	14,022
TiO₂	7,6887	7,8934	6,5182	7,5188	7,4773	7,2557	7,392
ZrO₂	0,2294	0,2469	0,2627	0,2669	0,2108	0,3331	0,258
CaO	0,1557	0,2146	0,1436	0,1982	0,1005	0,1046	0,153
V₂O₅	0	0,426	0	0	0	0	0,071
K₂O	0,0874	0	0,0539	0,1012	0,0835	0	0,054
Cr₂O₃	0	0,1168	0,1238	0	0	0	0,04
SO₃	0,1067	0	0,0887	0	0	0	0,033
Co₂O₃	0	0	0	0	0	0,1408	0,024
Nb₂O₅	0	0	0	0,0742	0	0	0,012
Cl	0	0	0	0	0	0,0125	0,002
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100

O Gráfico 2 representa a composição do rejeito de bauxita em termos de massa detalhado em percentual, nele podemos identificar os óxidos constituintes, já que escolhemos identificar os óxidos na EFRX da amostra.

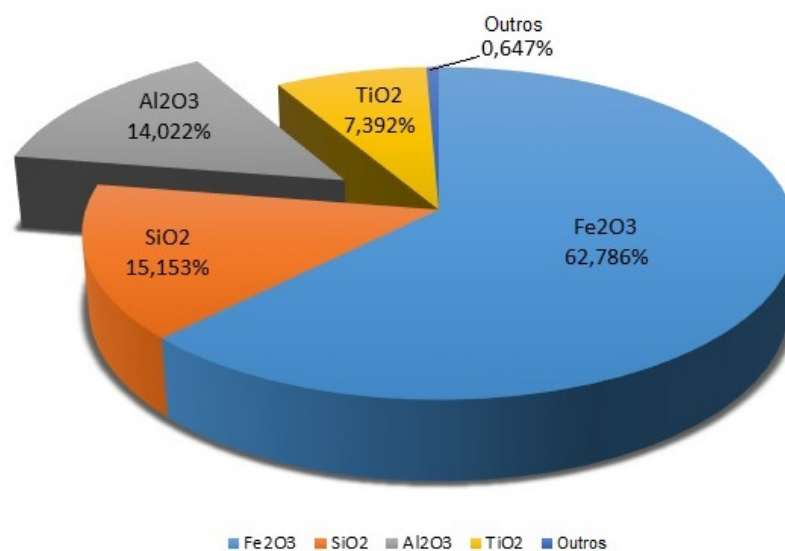


Gráfico 2 - Composição do rejeito de bauxita (%). Fonte: Autor, 2016.

O Gráfico 3 ilustra os óxidos menos presentes na amostra estudada e estão registrados conforme a Tabela 4.

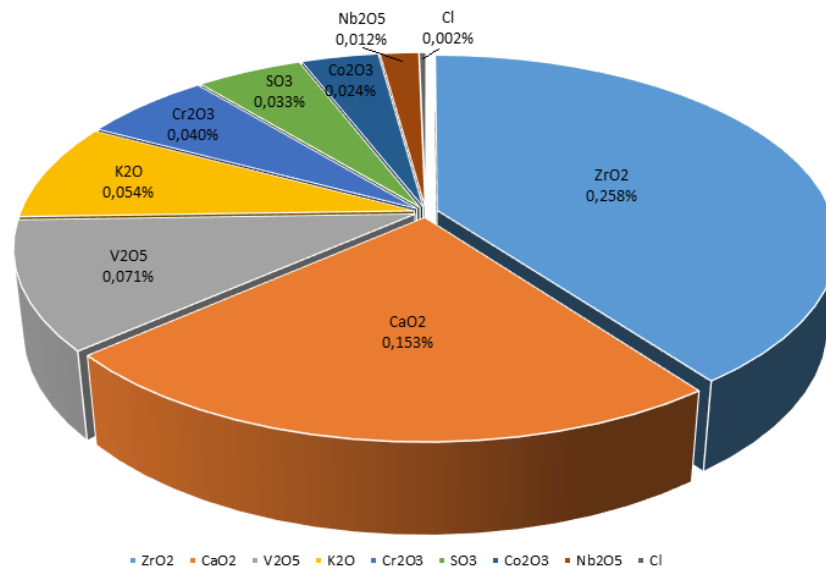


Gráfico 3 - Elementos no rejeito de bauxita (%). Fonte: Autor, 2016.

As amostras do rejeito mostram a presença dos seguintes elementos químicos, em forma de óxido, com as médias de teores:

- Alto: Fe_2O_3 ;
- Médio: SiO_2 e Al_2O_3 ;
- Baixo: TiO_2 ;
- Traços: ZrO_2 , CaO , V_2O_5 , K_2O , Cr_2O_3 , SO_3 , CO_2O_3 , Nb_2O_5 e Cl .

Usando a espectroscopia de FRX, Arenare (2009), para caracterizar a bauxita de Juruti relacionou os teores dos elementos:

- Alto: F e O ;
- Médio: Al ;
- Baixo: Si e Ti ;
- Traços: Na , Cl , S , P e Cr ;

Uma diferença encontrada foi em relação ao silício apresentando baixo teor na bauxita (<4,0%)¹³ e médio teor (15,15%) no seu rejeito, refletindo nas propriedades dos rejeitos aumento do teor dos minerais de ganga em relação ao minério *in natura*, neste caso da bauxita (Al_2O_3). Outra diferença se refere aos cinco elementos traço, não relatados na bauxita, e presentes no rejeito. Sendo eles *Zr*, *Ca*, *V*, *K* e *Nb*. Há dois elementos, *P* e *Na*, que aparecem na bauxita e não aparecem no rejeito.

Apresentando valor médio de 62,786% sendo o menor encontrado 57,912% e o maior 66,223%, o óxido de ferro é um dos principais componentes da bauxita e aparece na forma de hematita (Fe_2O_3) e/ou também como goethita ($FeOOH$).

O dióxido de silício com teor médio de 15,153%, registra um mínimo de 13,747% e o máximo de 16,816%, embora podendo ser encontrado em diversas formas na natureza, inclusive ametista. Na bauxita sua presença deve-se à caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) e ao quartzo (SiO_2). Como já ressaltamos, as dificuldades nas minas de bauxita, com seu alto teor e diminuição na granulometria era esperado que sua concentração estivesse elevada no rejeito, em relação ao teor de alumínio.

No rejeito, o óxido de alumínio tem teor médio de 14,022%, variando de teores entre as amostras. O teor mínimo registrado foi 11,762% e o máximo de 16,374%. Na bauxita o alumínio pode vir em forma de gibbsita, bohemita e diásporo, além da caulinita.

O dióxido de titânio apresentou um teor médio de 7,392%, sendo o menor teor igual a 6,518% e o maior igual a 7,893%, este pode aparecer na bauxita como dois minerais distintos: Anastásio e Rutilo.

Somando os teores médios dos óxidos de ferro, alumínio, silício e titânio resultam em 99,353% dos óxidos identificados nas amostras. Os demais elementos atômicos com menores teores na amostra de rejeito totalizam 0,647% da massa, somente mais dois outros óxidos estão presentes em todas as amostras: óxido de zircônio e óxido de cálcio.

A EFRX aplicada às amostras encaminhadas para o laboratório detectou a presença de 13 elementos químicos distintos por meio dos seus óxidos, os elementos encontrados foram: Alumínio (*Al*), Cálcio (*Ca*), Cloro (*Cl*), Cobalto (*Co*), Cromo (*Cr*), Enxofre (*S*), Ferro (*Fe*), Nióbio (*Nb*), Potássio (*K*), Silício (*Si*), Titânio (*Ti*), Vanádio (*V*) e Zircônio (*Zr*).

¹³ Dado tabelado conforme Sampaio (2005) dos principais minerais de alumínio contido nas bauxitas, através do processo de Bayer.

5. CONCLUSÃO

Ao realizarmos o estudo utilizando o método de DRX pudemos verificar cinco tipos de minerais abundantes nas amostras, em destaque a gibbsita, hematita, caulinita, anatásio e quartzo; na EFRX através da caracterização das amostras coletadas, os resultados apontaram a presença de 13 elementos químicos; em destaque estão: **alumínio, silício, ferro, e titânio** por estarem em quantidades elevadas em relação aos demais que são citados na tabela.

Não houve identificação quanto à presença de elementos e minérios nocivos, que possam representar algum dano ao meio ambiente, já que não há nenhuma adição de produtos químicos ao longo do processo; outro fator colaborador é que a área onde são depositados os rejeitos tem capacidade volumétrica pequena comparada às bacias de minério comum para este tipo de procedimento, além de serem fechadas e pela revegetação na área. Isto oferece um potencial menos ofensivo ao meio ambiente. A busca de aproveitamento dos rejeitos representa a produção de subprodutos e uma diminuição do material descartado, aumentando a vida útil a essas áreas.

A mina de Juruti tem uma produção média de 5 milhões de toneladas de minério lavrado por ano, com recuperação de 70%, assim o total de rejeito gerado nos 6 anos de operação chega a 9 milhões de toneladas. A possibilidade de utilizar parte desse material significa um aumento na vida útil das barragens de rejeito.

Os resultados mostram que o rejeito outrora descartado sem nenhuma análise mitificada tem potencial para ser reaproveitado para síntese de novos materiais contribuindo não só a fatores econômicos, científicos, mas ambientais, como sustentabilidade e preservação de acidentes como rompimento de barragens de rejeito.

REFERÊNCIAS

- ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **História do Alumínio**. 2008.
- ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. **Proposta De Limites De Emissões Atmosféricas De Fontes Fixas, Para Fábricas Existentes, Da Indústria Brasileira De Alumínio Primário**. 2010.
- ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. **Principais Substancias Metálicas**. Anuário Mineral Brasileiro. Brasília, 2015.
- ALCOA. **Juruti**. Disponível em https://www.alcoa.com/brasil/pt/info_page/Juruti.asp> acessado em 22 de janeiro de 2016.
- AMARAL, Alceu M. Relatório de Tarefas: **Decapeamento na Minas de Juruti**. Centro Técnico de Aprendizagem. Juruti: CTA, 2015.
- ARENARE, D. S. **Caracterização de Amostras de Bauxita Visando a Aplicação de Métodos de Concentração Gravítica**. 2009. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia. Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- BÁRDOSSY, G.; ALEVA, G.J.J. **Lateritic bauxites**. Developments in economic geology, 27. Amsterdam; New York: Elsevier, 1990. 624 p., 1990.
- BIONDI, J. C. **Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.
- BRANCO, Marina; VILLELA, Gustavo (Org.). **Maior desastre ambiental do Brasil, Tragédia de Mariana deixou 19 mortos**. 2016. Disponível em: <<http://acervo.oglobo.globo.com/em-destaque/maior-desastre-ambiental-do-brasil-tragedia-de-mariana-deixou-19-mortos-20208009>>. Acesso em: 19 jun. 2017.
- BRELAZ, Jânio S. Relatório de Tarefas: **Coleta de Amostras para Determinação de Teores**. Centro Técnico de Aprendizagem. Juruti: CTA, 2013.
- CAVALTINETO, Mário T. O. e ROCHA, Alexandre M. R. **Noções de Prospecção e Pesquisa Mineral para Técnicos de Geologia e Mineração**– Natal/RN: Editora do IFRN, 2010
- CETEM. Centro de Tecnologia Mineral. **Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil**. Ed. SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. e LINS, F. F. p. 398, Rio de Janeiro. 2001.

CETEM. Centro de Tecnologia Mineral. **Rochas e Minerais Industriais: Uso e especificações.** Ed. Adão Benvindo, da Luz e Fernando Antônio Freitas Lins. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005.

CETEM. Centro de Tecnologia Mineral: **Tratamento de Minérios.** Ed. Luz, A.B., Sampaio, J.A., França, S.C.A. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

CETEM. Centro de Tecnologia Mineral. **Rompimento de barragem da Mineradora Rio Pomba Cataguases afeta qualidade da água em MG e no RJ.** Rio de Janeiro. CETEM/MCT, 2015.

CHAVES, A. P. **Emissões e controles na indústria do alumínio.** In: Conferência internacional sobre tecnologias limpas para la indústria minera, VII. Anales. Rio de Janeiro: CYTEC/ALFA/OLAMI, 2006. p. 53-72.

CONSTANTINO, V.R.L. et al. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático.** Química Nova, Vol. 25 (3), p.490-498, 2002. São Paulo: SBQ, 2002.

CULLITY, B.D. **Elements of X-Ray Diffraction.** 2nd ed. London: Addison-Wesley, 1978.

DEER, C.V. **Espectrografia óptica de emissão.** In: Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. p. 121-158.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário mineral.** 2015.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Arrecadação da CFEM por substância.** Anuário Mineral Brasileiro. Brasília, 2016. Disponível em <https://sistemas.dnpm.gov.br/arrecadacao/extra/Relatorios/arrecadacao_cfem_substancia.aspx> acesso em 20 jan. 2016.

DUTRA, C.V., GOMES, C.B. **A fluorescência de raios X na geologia.** In: Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia. São Paulo: Edagard Blücher, 1984. p. 84-120.

EDWARDS, A.B. **Textures of the ore minerals and their signifiante.** 2nd ed. Australia: Brow Prior Anderson, 1974. 242p.

FERREIRA, Andson P. **Caracterização Tecnológica do Rejeito da Planta de Beneficiamento de Bauxita em Juruti- Pará.** 2016. 63 páginas. Dissertação de Mestrado em Recursos Naturais da Amazônia. Área de concentração: Bioprospecção e Manejo de Recursos

Naturais da Amazônia - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, Santarém, 2016.

FONSECA, J. J. L., ESTEVES, F. de A. **Influence Of Bauxite Tailings On The Structure Of The Benthic Macroinvertebrate Community In An Amazonian Lake (Lago Batata, Pará – Brazil)**. Revista Brasileira de Biologia. 59(3): 397-405. Rio de Janeiro, Brasil. 1999-08.

GIANNINI, P.C.F. **Depósitos e Rochas Sedimentares**. In: Teixeira, W.; Toledo, M. C.M.; Fairchild, T. R.; Taioli, F. (Orgs.). Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. Cap. 14, p.285-301.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pará: Juruti**. 2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pará: Juruti**. 2016.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 6º Edição. 2011.

JESUS, Carolina P. C. **Caracterização da lama vermelha e sua aplicabilidade no tratamento do corante têxtil Reativo Azul 19**. 114 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2011.

KERR, P.F. **Optical mineralogy**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1959. 442p.

KLEIN, C., HURLBUT, C.S. **Manual of Mineralogy**. After J.D. Dana, 21st Edition. John Wiley & Sons, 1993. 681p.

KLUG, H.P., ALEXANDER, L.E. **X-ray diffraction procedures**. 2nd ed. New York: John Wiley, 1974. 966p.

KURUSU, Renata G. **Concentração de Bauxita por Flotação Reversa**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

LEMES, Rosimeire. **Intemperismo e Erosão em Áreas Degradadas pela Mineração**. Rio de Janeiro: Guanabara, 2014.

LEONARDI, Fernanda A; LADEIRA, Francisco S. B e SANTOS, Marcilene. **Perfis Bauxíticos do Planalto de Poços de Caldas SP/MG: Análise Geoquímica e Posição na Paisagem**. Revista de Geografia (Recife), Vol. 27, n° 1. Esp, 2010.

LUZ, Adão B., SAMPAIO, Joao A., FRANÇA, Silvia C. A. **Tratamento de Minérios**. 4. Barragem de rejeito. CETEM/MCT, 2010. 5° ed. Rio de Janeiro.

- MANSUR, Herman S. **Caracterização de Materiais e Interfaces**. LASMAT. UFMG. 2011. Belo Horizonte.
- MÁRTIRES, Raimundo A. C. Alumínio. In **Anuário Mineral Brasileiro**. 2010. DNPM. Brasília.
- MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2015. Washington: U.S. Geological Survey, 2015, Annual. 17 p.
- MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2017. Washington: U.S. Geological Survey, 2016, Annual. 17 p.
- MENDONÇA, Tibério, **Minerais e Rochas**. Geologia Geral. São Paulo. Universidade Estadual do Vale do Acaraú – UVA. p. 01, 2017.
- NUEMANN, Reiner, SCHEINER, Claudio L., NETO, Arnaldo A. **Caracterização Tecnológica de Minérios**. Parte II, CETEM/MCT, 2010.
- PARFENOFF, A., POMEROL, C., TOURENQ, J. **Les Minéraux en Grains**. Paris: Masson et. Cie, 1970. 578p.
- PICOT, P., JOHAN, Z. **Atlas des Minéraux Metalliques**. Paris: BRGM, 1977. 403p. (Memoire 90).
- PINHEIRO, Wagner F., FILHO, Osvaldo B.F., NEVES, Augusto R. **Brasil**. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas/ Departamento Nacional de Produção Mineral. Brasília: DNPM, 2016.
- PJM, Prefeitura Municipal de Juruti. **Localização**. Disponível em <http://www.pmjuruti.pa.gov.br/portal1/municipio/localizacao.asp?iIdMun=100115063>. Acessado 15 de jan. 2016.
- PONTES, Tatiana A; SANTOS, Manoel R. P; FIGUEIRA, Bruno A. M. **Estudos Preliminares de Caracterização Tecnológica de Rejeitos da Mina de Juruti – PA**. VI Jornada Acadêmica Da UFOPA. Santarém, 2015.
- QUARESMA, Luiz F. Relatório Técnico 22: **Perfil da Mineração de Bauxita**. MME. Setembro, 2009.
- QUARESMA, Luiz F. Relatório Técnico 62: **Perfil do Alumínio**. MME. 2015.
- RIMA. Relatório de Impacto Ambiental. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA)**. Alessandro Trazzi. Elaboração: CTA - Serviços em Meio Ambiente; 2002.

- SALUM, M.J.G. **Tratamento de minérios: avanços e desafios tecnológicos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, p. 10, 2003, Belo Horizonte. **Anais Eletrônicos**. Belo Horizonte: IBRAM, 2003. 1 CD-ROM.
- SAMPAIO João A. e NEVES, Carlos H. B. **Bauxita** – M S. L. Minerais S.A. in Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil. Rio de Janeiro: CETEM, 2002. p 307-314.
- SAMPAIO Joao A.; ANDRADE, Monica C.; DUTRA, Achilles J. B. **Bauxita**. In: Luz, A.B. et al. Rochas e minerais industriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. p. 279-303.
- SANTANA, André L. **Sumário Mineral 2014: Alumínio**. Belém: DNPM, 2014.
- SERMENTAL. **História do Alumínio**. Disponível em <<http://www.sermetalaluminio.com.br/aluminio.aspx>>
- SCHENEIDER, C. L.; King, R. P.; Neumann, R. **Assessment of liberation with optical microscopy: a fast, low cost procedure**. In: VI Southern Hemisphere Meeting On Mineral Technology, Rio de Janeiro Anais 1: pp. 36-39. 2001.
- SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M.C.M.; DA MOTTA, M. **Lama Vermelha da Indústria de Beneficiamento de Alumina: Produção, Características, Disposição e Aplicações Alternativas**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007.
- SILVA, Maria L. M. C. e OLIVEIRA, Sônia M. B. **Caracterização Mineralógica e Química das Bauxitas de Nazaré Paulista (São Paulo)**. Revista Brasileira de Geociências. 22 (1): 93-99, mar. 1992.
- SOUZA, Douglas S. Relatório de Tarefas: **Amostragem em Canaletas**. Centro Técnico de Aprendizagem. Juruti: CTA, 2014.
- SUSLICK, S.B.; MACHADO, I.F.; FERREIRA, D.F. **Recursos minerais e sustentabilidade**. 2º ed. Campinas: Centro de Estudos de petróleo – CEPETRO/UNICAMP, 2005. 246p.
- THOMSON REUTERS DATASTREAM. **PRECIO ALUMINIO**. 2017. Disponível em: <<http://tematicas.org/indicadores-economicos/economia-internacional/precios/precio-aluminio/2016/>>. Acesso em: 19 jun. 2017.
- USGS. United States Geological Survey. **Mineral Commodity Summaries**. U. S. Department of the Interior. 2015.
- USGS. United States Geological Survey. **Mineral Commodity Summaries**. U. S. Department of the Interior. Annual. p. 2017.

UYTENBOGAARD, W., BURKE, E.A.J. **Tables for microscopic identification of ore minerals.** 2nd ed. New York: Oover Publ., 1985. 430p.