

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/807

## Determinação de Parâmetros Geológicos-Geotécnicos por Correlações em Depósitos de Bauxita

Leonardo Martins Agripino

Estudante, Faculdade Arnaldo, Juruti-PA, Brasil, leonardo\_agripino@yahoo.com.br

Marcio Fernandes Leão

Geólogo-Geotécnico, Tractebel/UFV, Belo Horizonte-MG, Brasil, marciotriton@hotmail.com

**RESUMO:** A determinação de parâmetros de resistência dos materiais, de forma consolidada, pode ser adquirida com investigação de campo e análise de laboratório. Em projetos de mineração a necessidade de resposta é praticamente imediata, principalmente em regiões tropicais onde solos dessa natureza são marcantes. Desta forma, o artigo buscou caracterizar os materiais geológicos-geotécnicos que compõem os platôs comuns na região amazônica, que sobrepõem os depósitos e reservas de minas de bauxita, trazendo uma compreensão inicial (conceito) de como essas camadas podem ser abordadas nas atividades minerárias. Assim, buscou-se trazer por meio de correlações os parâmetros geotécnicos desses materiais, validadas em campo por meio da experiência dos autores em projetos dessa natureza. A metodologia foi baseada na compreensão de um perfil estratigráfico típico da região de Juruti (PA) onde foram executadas investigações geológico-geotécnicas e adoção de correlações para solos tropicais de um perfil de 18 m, composto inicialmente por camada de solo orgânico, seguido por uma camada de solo argiloso, com profundidade variada; essa sobreposta ao depósito de bauxita. Além disso, a partir de ensaios de campo os materiais dos platôs foram parametrizados para diversos usos como: exploração e desenvolvimento de mina de bauxita na região amazônica em geral, apresentando coesão e ângulo de 30 kPa e 33°. Conclui-se que essa parametrização poderá tornar as operações mais viáveis, por meio da definição da compreensão do comportamento geotécnico desses materiais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bauxita; Amazônia; Geologia.

**ABSTRACT:** The determination of resistance parameters of materials, in a consolidated manner, can be acquired through field investigation and laboratory analysis. In mining projects, the need for a response is practically immediate, especially in tropical regions where soils of this nature are notable. In this way, the article sought to characterize the geological-geotechnical materials that make up the common plateaus in the Amazon region, which overlap the deposits and reserves of bauxite mines, bringing an initial understanding (concept) of how these layers can be approached in mining activities. Thus, we sought to bring the geotechnical parameters of these materials through correlations, validated in the field through the authors' experience in projects of this nature. The methodology was based on the understanding of a typical stratigraphic profile of the Juruti region (PA) where geological-geotechnical investigations were carried out and the adoption of correlations for tropical soils of an 18 m profile, initially composed of an organic soil layer, followed by a layer of clayey soil, with varying depths; this overlaps the bauxite deposit. Furthermore, based on field tests, the plater materials were parameterized for various uses such as: exploitation and development of bauxite mines in the Amazon region in general, presenting cohesion and an angle of 30 kPa and 33°. It is concluded that this parameterization can make operations more viable, by defining the understanding of the geotechnical behavior of these materials.

**KEYWORDS:** Bauxite; Amazon; Geology.

## 1 INTRODUÇÃO

Aspectos relacionados a investigação geológico-geotécnica acompanham a vida útil de qualquer empreendimento. Na mineração, os resultados desses trabalhos suportam projetos correntes e futuros, buscando sempre a segurança das pessoas, meio ambiente e operações. Atrelados a isso, os exercícios dos trabalhos de campo e ensaios de laboratórios são amplamente utilizados na obtenção de dados confiáveis e rastreáveis, sendo a engenharia geotécnica a disciplina guardiã de tais procedimentos e execução, em harmonia com padrões e normas vigentes.

Na região norte do país, alvo desse trabalho, a formação geológica se apresenta sob forma de platôs. Com a decomposição de silicatos e argilominerais, ocorre a remoção de grande parte da sílica, enquanto os óxidos de alumínio e ferro são concentrados. A formação é uma rocha rica em óxido de alumínio, de composição mineralógica variável de três minerais: gibbsita, diásporo e boehmita (oxi-hidróxidos de alumínio), com ocorrência subsidiária de óxidos de ferro, argila, sílica, dióxido de titânio, entre outras (AQUINO, 2007; SOUZA, 2008). A bauxita lavrada economicamente possui alumina ( $Al_2O_3$ ) com teores variando entre 50 e 55%.

A necessidade de estudar o comportamento desses materiais constituintes, sob a ótica geotécnica, é de extrema importância e de grande relevância para operações cada vez mais seguras, dada a posição dessa *commodities* no cenário nacional e sua ocupação no ranking mundial. A determinação da melhor metodologia e melhor empregabilidade dos recursos necessários para aquisição de dados pode variar conforme vão se configurando os perfis geológicos-geotécnicos.

O Brasil é grande produtor de alumínio, ocupando a 15ª posição no ranking mundial, seguindo as principais empresas em solo brasileiro: Mineração Rio do Norte S.A.(MRN), maior produtora de bauxita no Brasil, seguida pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) e a Hydro Mineração Paragominas (MPSA), cada uma com participações semelhantes no mercado nacional. Outras empresas produtoras são a Alcoa Alumínio S.A. e a Novelis do Brasil Ltda.

Simoni (2029) escreve segundo Mártires (2001) e Santana et al. (2014), que a maior parte das reservas de bauxita estão localizadas em regiões tropicais e subtropicais do mundo. As reservas mundiais de bauxita conhecidas são de aproximadamente 25.6 bilhões de toneladas (dados de 2013). Os maiores produtores são a Guiné e a Austrália, com aproximadamente 7 e 6 bilhões de toneladas, respectivamente.

O método de lavra corresponde à sistematização e coordenação dos serviços de exploração de uma jazida, ou seja, é a técnica de extração do material, e sua escolha é determinante durante o estudo de viabilidade econômica de um projeto de mineração. O principal objetivo de um método de lavra é a utilização completa, segura e econômica das substâncias minerais com o mínimo de impactos ambientais (LOBATO, 2012).

Manter as cavas estáveis, os acessos seguros e as operações em pleno regime de trabalho requer habilidades e conhecimentos geotécnicos. Independente da profundidade das cavas, no caso desse trabalho são cavas rasas, onde os parâmetros de resistências dos materiais e geometria dos taludes devem ser estabelecidos numa condição de satisfatória ao avanço da lavra.

O sistema de lavra em tiras consiste em remover o estéril de uma faixa ou bloco a ser lavrado para uma faixa ou bloco que já foi lavrado, tendo assim uma diminuição da distância de transporte do estéril e facilitação da exposição do minério, bem como agilidade nos processos de recuperação ambiental (PIMENTEL, 2009).

A área de estudo está localizada na região amazônica brasileira, no conhecido cinturão da bauxita, que compreende a região equatorial do planeta Terra. A região é parte de um sistema integrado de produção de bauxita, que inclui atividades de: mineração, beneficiamento e transporte do produto até destinatário final. Comumente, o método de lavra utilizado nas minas de bauxita na Amazônia é o método de lavra em tiras, o mais indicado para estes tipos de depósitos. O processo para extração da bauxita compreende operações unitárias cíclicas, realizadas em faixas sequenciais: supressão vegetal, decapeamento, lavra e recuperação ambiental. Por permitir nivelamento e reabilitação da área logo após a lavra do minério, o método de lavra em tiras apresenta menor impacto ambiental e visual. A Figura 1 ilustra as operações no processo de lavra da bauxita e que são resumidas na sequência:

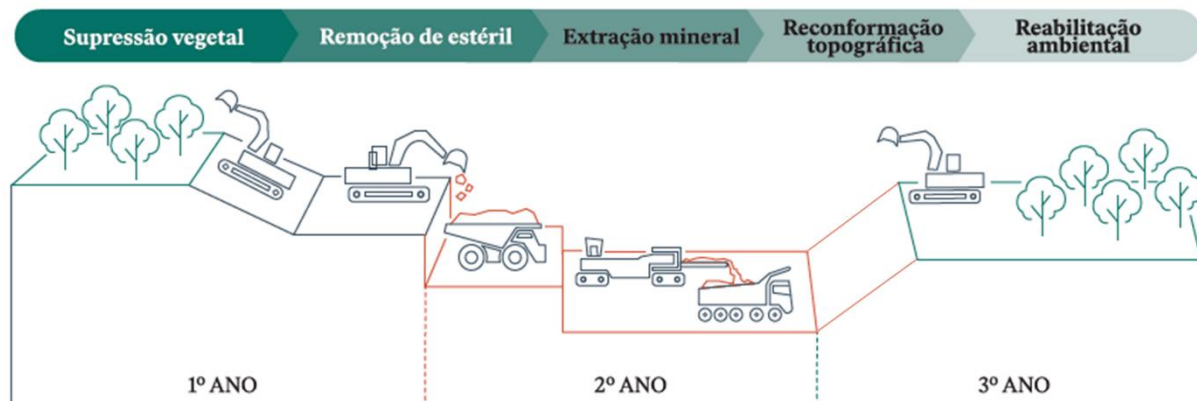


Figura 1 - Fluxo do processo de lavra da bauxita.

- **Supressão vegetal:** a supressão vegetal é a etapa de retirada da vegetação localizada na área de avanço da lavra;
- **Decapeamento:** etapa de remoção do estéril para expor a camada de bauxita. Na lavra em tiras, o capeamento não é transportado para um bota-fora ou pilhas de estéril, mas depositado dentro dos cortes formados nas etapas anteriores da lavra. O método de decapeamento a ser utilizado varia conforme a espessura do estéril na tira. A depender do método, o decapeamento pode ser feito com trator de esteiras ou com escavadeira de grande porte e caminhão fora-de-estrada;
- **Lavra:** etapa de extração minério, propriamente dito. A lavra pode ser feita pelo método contínuo em que o equipamento realiza a etapa de desmonte e carregamento simultaneamente, ou através do método tradicional, em que o desmonte é feito com trator e o carregamento com pá carregadeira e/ou escavadeira. O transporte do minério para o britador é feito através de caminhões rodoviários;
- **Beneficiamento:** a etapa de beneficiamento visa adequar a bauxita nas especificações granulométricas, podendo ser por um moinho, britador, peneira e ciclone;
- **Reabilitação de áreas mineradas:** na reabilitação, o relevo original é reproduzido, o solo rico em matéria orgânica é adicionado e o terreno é preparado para receber as mudas que restabelecerão a cobertura vegetal. A meta da empresa é recuperar na proporção de 1:1, ou seja, a cada 1 hectare disponibilizado no ano (área lavrada, menos a área utilizada para infraestrutura) será recuperado 1 hectare em até dois anos;

A elaboração de projetos de escavação e estabilidade dos taludes abertos apresenta elevado dinamismo e muitas das vezes a execução de ensaios de laboratório para determinação de parâmetros é tardia à necessidade operacional. Desta forma, o artigo buscou caracterizar os materiais geológicos-geotécnicos que compõem os platôes comuns na região amazônica, que sobrepõem os depósitos e reservas de minas de bauxita, trazendo uma compreensão inicial (conceito) de como essas camadas podem ser abordadas nas atividades minerárias, utilizando uma região em Juruti como estudo de caso.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia foi baseada na compilação de resultados de  $N_{SPT}$  para uma área de extração de bauxita na região norte do Brasil, por meio de 9 sondagens à percussão, espaçadas lateralmente em 20 m. Para essas sondagens foi realizado ensaio  $N_{SPT}$  de metro a metro. Para a confirmação do topo rochoso, ou melhor, a profundidade impenetrável à percussão foram utilizados furos de exploração mineral ordenados em malhas e dentre outros objetivos, que visaram determinar modelo geológico do corpo mineralizado (não apresentado devido ao sigilo das informações).

Nessa região ocorre a extração de bauxita em platôes (Figura 1). Esses resultados foram corrigidos considerando eficiência de 60% da energia ( $N_{SPT60}$ ).

A não execução de ensaios específicos para a determinação dos parâmetros de resistência de materiais não impede a aplicação de outros métodos determinísticos para obtenção desses. Assim, a definição desses parâmetros pode ser realizada através de correlações divulgadas na literatura, em conjunto com as características geológicas dos materiais, sendo essa a última etapa da metodologia. Considerando as etapas (Figura 1) foram selecionadas correlações para a obtenção desses parâmetros geotécnicos.

A partir da interpretação das sondagens e mapeamento geológico geotécnico foi possível verificar que a espessura e profundidade ao longo da região amazônica é variável podendo, em alguns casos, atingir 18 m. A composição dessas camadas não variam, sendo uma camada inicial composta de solo orgânico, seguido por uma camada de solo argiloso, essa sobreposta ao depósito de bauxita.

A resistência ao cisalhamento das argilas, acima da tensão de pré-adensamento é caracterizada pelo ângulo de atrito interno efetivo. O seu valor é variável conforme o teor de argila, de modo que ele é menor quando o solo é mais argiloso. Godoy (1983) apresenta (Equação 1) a correlação para a definição do ângulo de atrito:

$$\phi = 28^\circ + 0,4 \times N_{SPT} \quad (1)$$

Na situação drenada para solos estruturados lateríticos Berberian (2015) propôs a seguinte correlação (Equação 2) para estimativa da coesão:

$$c' = N_{SPT} / 0,35 \text{ (kPa)} \quad (2)$$

Ambas as equações (1 e 2) foram utilizadas para calibração dos resultados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os depósitos de bauxita de Paragominas estão localizados na parte NE do estado do Pará. A região de Paragominas é marcada por tabuleiros e platôs dissecados e isolados, com cobertura de argilas amarelas (Argila Belterra) e crostas ferro-aluminosas sobrepostas aos sedimentos das Formações Ipixuna ao norte e Itapecuru, ao sul. Em geral, a altitude desses platôs não excede 200 m, apenas na parte sul em direção à cidade de Imperatriz pode chegar a 400 m. (KOTSCHOUBEY, *et al.* 2016). As bauxitas de Paragominas estão relacionadas ao horizonte laterítico ferro-aluminoso de idade Terciária inferior (Paleógeno) que é sotoposta a essas argilas creme amareladas, designadas Argila de Belterra e ao saprolito, formado de argilas caulínicas variegadas ou manchadas. A Figura 2 mostra o perfil típico da região de Paragominas identificado.

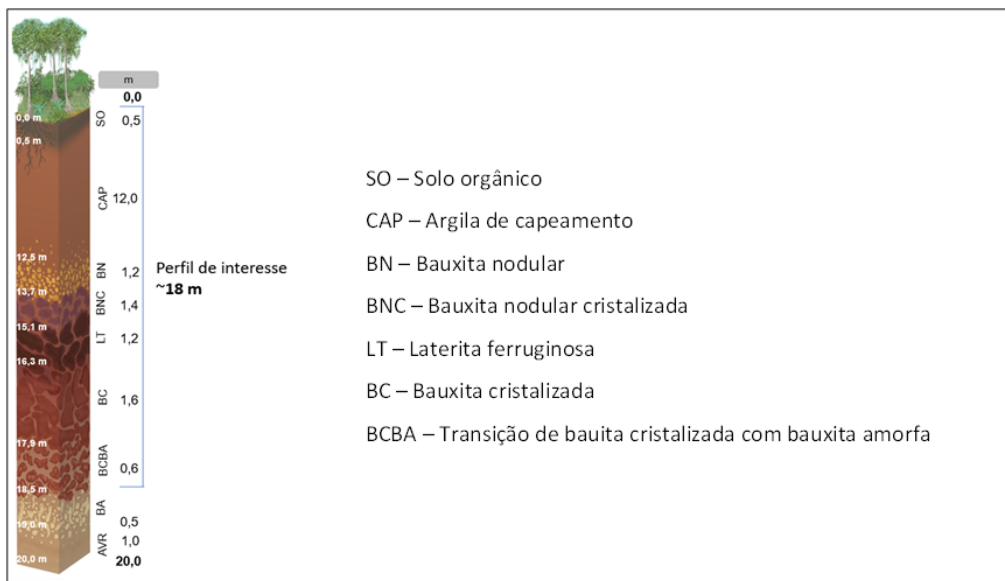


Figura 2. Perfil típico da região da cava da Mineração Paragominas

A fundação natural é caracterizada por argila, de textura argilo-siltosa, por vezes arenosa, podendo ocorrer fragmentos e concreções lateríticas, variando a silte argiloso. A cor é variável apresentando manchas irregulares, cores diversas (amarela, vermelha, róseo, marrom, branco etc.). A camada de argila é espessa, com espessura variada, em alguns casos com mais de 15,0 m.

A Figura 3 apresenta o número de golpes dos ensaios  $N_{SPT}$  nesse material em função da tensão vertical efetiva ( $\sigma'_v$ ). Observa-se que a argila apresenta  $N_{SPT}$  superior a 10 golpes com média de 36 golpes, com consistência classificada como rija a dura. Eventualmente podem ocorrer trechos de menor resistência, principalmente na interface dos materiais.

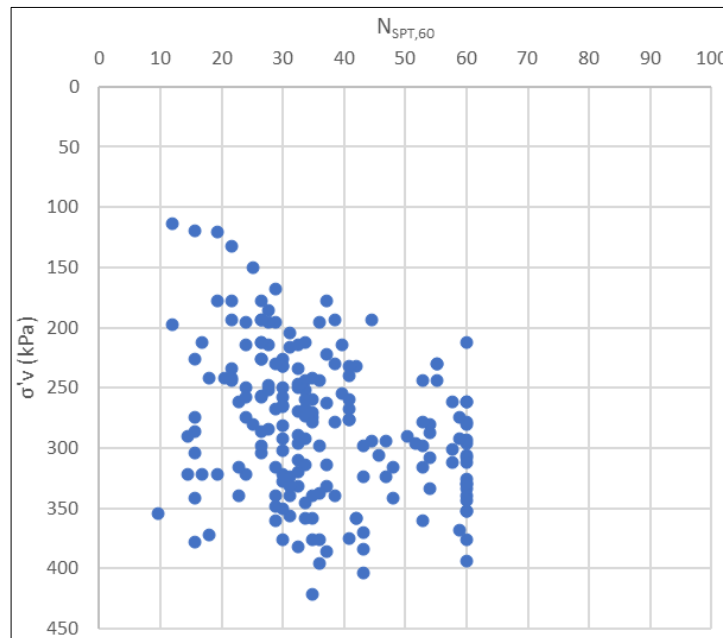


Figura 3. Relação entre a tensão vertical efetiva ( $\sigma'_v$ ) e valores do  $N_{SPT60}$ .

Os parâmetros médios de resistência definidos para a argila estão apresentados na Tabela 1 (obtidos pelas Equações 1 e 2). Dada a variabilidade dos resultados de  $N_{SPT}$  na argila, pode considerar, de forma conservadora, o  $N_{SPT}$  de 11 golpes nas equações 1 e 2. Assim, estimou-se o ângulo de atrito e a coesão efetiva da argila iguais a  $33^\circ$  e 30 kPa, respectivamente, estando bastante coerentes com solos tropicais típicos da região com certo nível de laterização. Destaca-se que amostras indeformadas locais podem alcançar até 60 kPa de coesão, conforme Souza (2008), fruto do elevado nível de laterização das amostras. Desta forma, a nível conceitual os resultados se mostram factíveis, considerando uma formação laterítica em estágio intermediário, conforme: dados geológicos, características geotécnicas e as sondagens.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos de resistência do material

Material	$c'$ (kPa)	$\varphi$ ( $^\circ$ )
Argila	30	33

Em estágio intermediário de evolução, tornando essa camada superficial mais porosa e ainda rica de areia e siltes, justificando parâmetros de resistência inferiores a 60 kPa. Apesar dos grãos serem fortemente aderidos por óxido de ferro e óxido de alumínio, as aglomerações formadas comportam-se como grãos arenosos soltos, ou seja, as agregações não estão ligadas entre si, devido ao processo de laterização ainda em desenvolvimento. Isso é característico da formação pedológica conhecida como latossolo, ou geotecnicamente falando, devido à laterização e no caso ainda em evolução.

Essa evolução pedogenética na qual o subsolo, pela ação do intemperismo, permite que a sua porção superior externa se altere quimicamente prevalecendo óxidos hidratados de ferro, sobre a permanência do argilomineral do tipo caulinita, dando o aspecto de coloração avermelhado confere uma estrutura porosa com agregações estáveis conforme exposto anteriormente (COSTA, 1991). Portanto, o solo inicialmente formado

pela diminuição da rocha sofre transformações químicas. A partir daí, o processo de lixiviação se inicia com a água levando os elementos químicos (lixiviáveis) para o nível de base, porção mais baixa do terreno.

Por outro lado, durante esses processos, a camada de solo residual formada abaixo do solo laterítico irá se enriquecer desses sais com ligações fracas e estará composta por materiais menos estáveis, muitas vezes compostos por minerais ativos. Considerando a condição geomorfológica mais inclinada, verifica-se que o fluxo de água infiltrando pelo solo laterítico poroso entra em contato com a camada saprolítica, que praticamente aflora nas porções mais inferiores da região, causando instabilidade e intensificando o processo de perda de solo, principalmente nas regiões mais inclinadas onde esse fluxo atinge maiores velocidades, a este processo soma-se um cisalhamento laminar que ocorre na camada mais superficial, que apresenta um baixo peso específico, bastante poroso cuja coesão aferida em laboratório é praticamente nula.

Na maior parte do tempo, a área apresenta um comportamento não saturado, mas sob condições pluviométricas duradouras, sua camada superior pode apresentar uma queda brusca de sucção e, conseqüentemente, vir a saturar, apresentando-se como um material de baixa resistência que, em condições de ruptura, poderia se comportar sob solicitações drenadas, considerando a geometria do problema e a granulometria mais arenosa. Por se tratar de um perfil pré-adensado (devido à perda de solos no passado pelo processo erosivo), as análises de resistência geotécnica podem ser realizadas em condições efetivas.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia e resultados obtidos demonstraram que a proposta aqui apresentada se mostrou compatível com o atendimento às decisões geotécnicas e a necessidade de lavra. Assim, fazendo utilizando uma análise crítica e cruzada das informações (revisão bibliográfica, descrições em campo, juntamente com revisitação dos furos de exploração mineral do platô, sob os auspícios de avaliação tátil-visual) é possível promover deliberações para a determinação de parâmetros de resistência desses materiais laterizados. Entende-se que a estimativa dos parâmetros por meio do  $N_{SPT}$  pode subsidiar os projetos a nível conceitual dessa natureza, permitindo o desenvolvimento de correlações mais refinadas mediante a validação de ensaios em campanhas de amostragem complementares realizadas na localidade.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aquino, T.F. (2007) *Beneficiamento Químico da Bauxita de Santa Catarina*. Florianópolis: UFSC, 2007. 103p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Berberian, D (2015). Engenharia de Fundações. 2º. ed. Brasília: INFRASOLOS.
- Costa, M.L (1991) *Aspectos Geológicos dos Lateritos da Amazônia*. Revista Brasileira de Geociências. 21(2): 146-160, junho de 1991.
- Godoy, N. S. (1983). Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático. Palestra. São Carlos (SP): Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- Kotschoubey B., Truckenbrodt W. & Hieronymus B. (2016) *Bauxite deposits of Paragominas*. In: A. Carvalho, B. Boulangé, A.J. Melfi & Y. Lucas (eds.) *Brazilian Bauxites*. USP/FAPESP/ORSTOM, São Paulo, p. 75-106
- Congedo, L. *Semi-automatic classification plugin documentation*. Release, v. 4, n. 0.1, p. 29.
- Lobato, R. S. (2012) *Análise de produtividade na operação de decapeamento de estéril da mina de bauxita de Juruti – PA. Marabá – PA*: UFPA- Universidade Federal do Pará. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente, 36 p.
- Mártires, Raimundo Augusto Corrêa (2001). *Balanço Mineral Brasileiro*. DNPM, 50p.
- Pimentel, E. N. (2009) *Aspectos gerais da mina de bauxita de Paragominas. Estudo comparativo e elaboração de modelos ótimos de logística operacional – troca de turnos*. Marabá – PA. UFPA-

Universidade Federal do Pará. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente, 51 p.

Santana, Andre Luiz (2014). *Sumário Mineral 2014: Departamento Nacional de Produção Mineral*. Ministério das Minas e Energia. Brasília, p. 28.

Simoni, Marcus Vinicius Barros de (2014). *Planejamento de longo prazo em mina de bauxita [manuscrito]: trade off entre a ordem da operação em platôs de bauxita*. 18 p.

Souza, W.B. (2008) - *Estudo da Adição de Lama de Bauxita em Polímero de Poli (Metacrilato de Metila) por meio de Polimerização em Massa e Moldagem em Casting*, Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, autarquia vinculada á Universidade de São Paulo, São Paulo, 106 p.