

APLICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE PROCESSOS MINERAIS EM CAMADAS DE PAVIMENTO

Daniel Henrique Martins Coelho (IC) e Patricia Barboza da Silva (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade da aplicação do resíduo da extração de bauxita com adição de 5,0% e 8,0%, em massa, de cal hidratada para uso em camadas de pavimentos. A adição da cal hidratada se deu para que fosse possível promover a ocorrência de reação pozolânica, visto que o rejeito possui sílica em sua composição, material potencialmente pozolânico. Para avaliação do material utilizado, foram realizadas análises de granulometria e massa específica aparente, seguindo pelo ensaio de compactação Proctor para a determinação da umidade ótima e massa específica aparente seca máxima do rejeito e com as adições de cal hidratada. Para avaliação do comportamento mecânico realizou-se o ensaio de resistência à compressão simples em idades de cura de 7, 28 e 91 dias e não foi observada a ocorrência de reação pozolânica.

Palavras-chave: Rejeito de bauxita. Cal. Pavimento.

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the feasibility of applying the residue from the bauxite extraction with the addition of 5.0% and 8.0%, by mass, of hydrated lime for use in pavement layers. The addition of hydrated lime was made so that it was possible to promote the occurrence of a pozzolanic reaction since the tailings have silica in their composition, potentially pozzolanic material. To evaluate the material used, analyzes of granulometry and apparent specific mass were carried out, followed by the Proctor compaction test to determine the optimum moisture and maximum dry density of the tailings and also with the addition of hydrated lime. To evaluate the mechanical behavior, the simple compression resistance test was performed at ages of cure of 7, 28 and 91 days, which enabled the verification of resistance gain with the cure process, showing the occurrence of a pozzolanic reaction.

Keywords: Bauxite residue. Lime. Pavement.

1. INTRODUÇÃO

A sociedade desenvolveu-se de forma desordenada, com isso, começaram-se a agravar os níveis de degradação ambiental gerando significativo impacto negativo em nossas vidas. Em 1987 foi definido o conceito de desenvolvimento sustentável pela Comissão Mundial do Desenvolvimento e Meio Ambiente: “Atender às necessidades da geração presente sem comprometer a habilidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades”.

No âmbito do desenvolvimento sustentável, observa-se um crescente investimento em pesquisa para encontrar maneiras de reaproveitar os resíduos gerados pelas atividades de empresas. Esses estudos são importantes, pois grandes volumes de resíduos são gerados, principalmente no campo da mineração.

Tabela 1 - Classificação da Produção e das Reservas Minerais Brasileiras no Mundo

Minerais	Produção Brasileira	Posição no Ranking	Reservas Brasileiras	Posição no Ranking
Bauxita	14%	3º	6,8%	5º
Cobre	2%	5º	2%	13º
Rochas Ornamentais	7,7%	3º	5,6%	6º
Ouro	2,3%	12º	3,3%	9º
Minério de Ferro	17%	2º	11%	5º
Caulim	6,8%	5º	28%	2º
Manganês	20%	2º	1,1%	6º
Nióbio	98%	1º	98%	1º
Tantalita	28%	2º	50%	1º
Estanho	4,1%	5º	13%	3º
Zinco	2,4%	12º	0,85%	6º

Fonte: PNM 2030/IBRAM – 2012

Observa-se a partir da Tabela 1 que o Brasil é um dos maiores produtores de minério de bauxita no mundo, por isso, é um dos maiores setores da economia de nosso país. Entretanto, como utiliza recursos não renováveis, gera um grande impacto no meio ambiente.

Ao iniciar o beneficiamento do minério da bauxita, geram-se sub-produtos que chamamos de rejeitos. Tais rejeitos muitas vezes são armazenados em barragens.

As barragens de rejeitos ocupam grandes áreas e por isso, além de causar impactos negativos no meio ambiente, provoca insegurança na vida da população que vive em suas proximidades.

Dentro desse contexto, o objetivo principal do presente trabalho é avaliar o uso do rejeito da produção extração de bauxita em camadas de pavimento de modo a encontrar uma alternativa de uso viável contribuindo para minimizar os impactos negativos gerados pelos rejeitos de mineração.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A BAUXITA

A bauxita, rocha na qual é extraído o minério de alumínio, foi identificada pela primeira vez em 1821, na localidade de Les Beaux, no sul da França, por Berthier. Nessa época o metal alumínio ainda não era conhecido (MÁRTIRES, 2009).

O alumínio é o elemento metálico mais abundante da crosta sendo superado apenas pelo oxigênio e o silício. A história de sua descoberta iniciou-se na segunda metade do século XVIII, quando se suspeitou da existência do óxido de um metal com fortíssima afinidade pelo oxigênio e que posteriormente foi denominado de albumina. Mas foi somente no século XIX que começaram as primeiras tentativas de obter-se o metal, que foi denominado alumínio. Após várias experiências, por volta de 1850 obteve-se pela primeira vez grandes quantidades de alumínio por processo químico a partir de rochas. Simultaneamente desenvolvia-se o processo de eletrólise, e no final do século XIX, iniciou-se a primeira fundição, na Inglaterra (CARVALHO, 1989).

A partir daí a utilização de alumínio aumentou rapidamente e, em particular, nos últimos quarenta anos, a demanda mundial cresceu a proporções bem elevadas (cerca de 10% ao ano). A bauxita é de longe a mais importante fonte alumínio, da qual extrai-se cerca de 95% do metal utilizado (CARVALHO, 1989).

A rocha de importância industrial para obtenção do alumínio metálico e de muitos outros compostos de alumínio é a bauxita, sendo essencialmente um produto do intemperismo e lixiviação de uma gama variável de rochas. Ela ocorre geralmente em clima tropical ou subtropical com taxas de precipitação pluviométrica elevada. O produto final é uma rocha rica em óxido de alumínio, cuja composição mineralógica predomina uma associação em proporção variável de três minerais: gibbsita ou hidrargilita, $\gamma\text{Al}(\text{OH})_3$, diaspório, $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$, e boehmita, $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$, sendo que as proporções das três formas variam dependendo da localização geográfica (CONSTANTINO et al, 2002).

Trata-se de uma rocha de coloração avermelhada, rica em alumínio, com mais de 40% de alumina (Al_2O_3). A proporção dos óxidos de ferro determina a coloração da rocha. Assim,

a bauxita branca contém de 2% a 4% de óxidos de ferro, ao passo que na bauxita vermelha essa proporção atinge 25% (SAMPAIO et al., 2008).

As impurezas presentes na bauxita são óxidos de ferro (hematita, magnetita e goetita, entre outros), sílica, óxido de titânio e aluminossilicatos, em quantidades que variam com a região de origem, causando alterações no aspecto físico do minério que pode variar de um sólido marrom-escuro ferruginoso até um sólido de cor creme, duro e cristalino. A cor e a composição do sólido podem variar em um mesmo depósito de bauxita. A composição típica da bauxita de uso industrial é: 40-60% de Al_2O_3 ; 12-30% de H_2O combinada; 1-15% de SiO_2 livre e combinada; 1-30% de Fe_2O_3 ; 3-4% de TiO_2 ; 0,05-0,2% de outros elementos e óxidos (CONSTANTINO et al, 2002).

As reservas mundiais de bauxita somaram 27,8 bilhões de toneladas, apresentando um pequeno decréscimo em relação ao ano de 2015. As principais reservas localizam-se na Guiné e Austrália, com 7,4 bilhões e 6,2 bilhões de toneladas, respectivamente. O Brasil, registra o terceiro lugar neste ranking, com 2,6 bilhões de toneladas seguido da Jamaica com 2,0 bilhões de toneladas (USGS, 2017). Cerca de 95% da produção é utilizada na obtenção do alumínio metálico, pelo processo Bayer, seguido do processo Hall-Héroult (Sampaio et al., 2008).

2.1.1. Depósitos de Bauxita

A distribuição geográfica da bauxita sugere que os depósitos de bauxita podem ser agrupados em grandes áreas como no Caribe na América Central, na Guiana e no Brasil na América do Sul, em Guiné e Camarões na África e também na Austrália. As áreas menores incluem encontram-se na Indonésia e Malásia, China, Rússia, Sul da Europa e Arkansas nos Estados Unidos (GOW & LOZEJ, 1993).

Segundo Sampaio et al. (2008) a condição essencial à formação da bauxita é a existência de um clima tropical (uma média anual acima de 20°C), alternando as estações seca e úmida, que favorecem o processo natural de lixiviação. Dessa forma, silicatos e argilominerais são decompostos, há remoção da maior parte da sílica, enquanto os óxidos de alumínio e ferro são concentrados. Desse modo, obtém-se maior taxa de formação de bauxita quando ocorre a elevada porosidade na rocha, uma cobertura vegetal com adequada atividade bacteriológica, topografia plana ou, pelo menos, pouco acidentada que permita o mínimo de erosão e longo período de estabilidade e intensa alteração das condições climáticas, principalmente, as estações secas e úmidas.

Em 2016, a produção mundial de bauxita alcançou 262,4 milhões de toneladas, quantidade inferior à observada no ano anterior, de 292,5 milhões de toneladas, com uma variação negativa de 10,3%. A Austrália segue na liderança mundial crescendo, com 82,0

milhões de toneladas, seguida da China com 65,0 milhões de toneladas. A produção brasileira embora tenha crescido, permanece no terceiro lugar com 34,5 milhões de toneladas. O destaque no ranking dos maiores produtores mundiais em 2016 foi a Malásia, que apresentou uma queda brutal de sua produção caindo para um milhão de toneladas, motivado por um acidente ambiental de grandes proporções, que forçou as autoridades daquele país à interrupção no fluxo de produção. Quanto ao restante, a Índia passou ao quarto lugar com 25,0 milhões, Guiné com 19,7 milhões (BRASIL, 2017).

2.1.2. Depósitos de Bauxita no Brasil

Cinco estados brasileiros (São Paulo, Pará, Santa Catarina, Minas Geras e Maranhão) são detentores de reservas de bauxita grau metalúrgico. Essas reservas encontram-se altamente concentradas geograficamente. Somente no estado do Pará encontram-se 90,8% dessas reservas que, quando somada as reservas de Minas Gerais, perfazem 93,3%. As reservas desse tipo de bauxita são da ordem de 2,95 bilhões de toneladas (MÁRTIRES, 2009).

Da mesma forma que as reservas de grau metalúrgico, as reservas de bauxita refratária encontram-se concentradas em Minas Gerais (45,5%) e Pará (35%). Os demais estados detentores de reservas desse tipo de bauxita são: Amapá, São Paulo, Espírito Santo, Santa Catarina e Rio de Janeiro. O volume total das reservas de bauxita refratária é de 573,9 milhões de toneladas (MÁRTIRES, 2009).

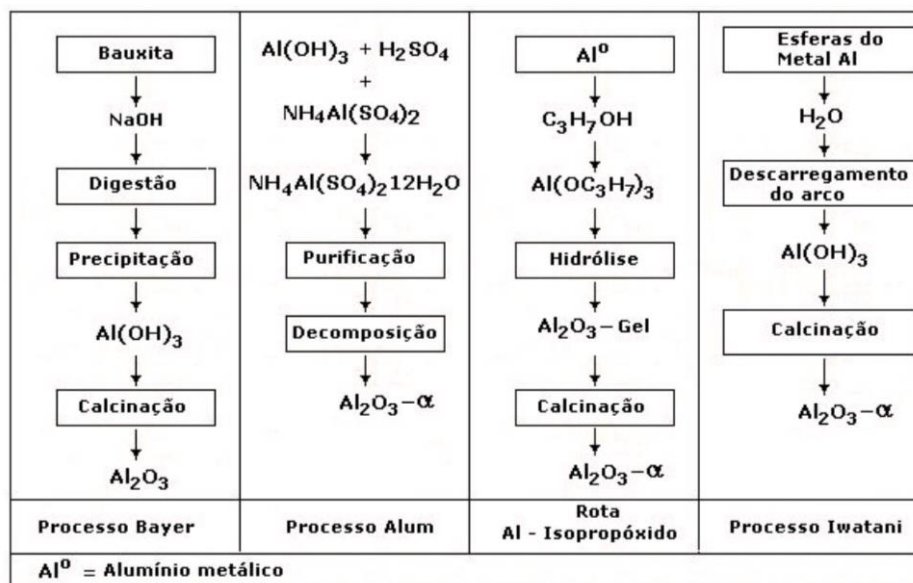
2.1.3. Produção de Alumina e Alumínio

As jazidas de bauxita passam por um ciclo que é composto de: prospecção, pesquisa mineral, delineamento da jazida, planejamento de lavra, produção de bauxita, beneficiamento, recuperação mineral e o descomissionamento.

A primeira operação do processo de exploração comercial do bem mineral é a lavra. O beneficiamento tem função de melhorar a qualidade do minério, nesse momento, separa-se e concentra-se os minérios por meios físicos.

A alumina pode ser obtida por um dos quatro processos indicados no Quadro 1.

Quadro 1 – Processos de obtenção de alumina



Fonte: High-Tech, 1998.

O material utilizado para a pesquisa foi obtido através do processo Bayer. De forma generalizada, o processo Bayer constitui a tecnologia comumente empregada para obtenção da alumina a partir da bauxita, a partir do princípio básico de que os hidratos de alumínio são muito solúveis em soda cáustica, o que não ocorre com os demais óxidos constituintes da rocha. A metodologia geral do processo compreende a dissolução da bauxita em soda cáustica, sob elevadas temperaturas e pressões, para solubilizar a alumina e precipitar compostos insolúveis com sílica. Na sequência, a solução de aluminato de sódio é resfriada, separada das substâncias insolúveis e enviada para tanques para cristalização e precipitação da alumina (PEDROSA, 2012).

As condições do processo são afetadas primariamente pela proporção relativa entre os minerais de alumínio (gibbsita e boehmita), ferro (goethita e hematita) e sílica (quartzo e argilominerais). A alumina processada é denominada 'alumina aproveitável', com o quartzo constituindo a sílica insolúvel e a sílica presente nos argilominerais caracterizando a chamada 'sílica reativa', pois reage com a soda cáustica formando um composto insolúvel de alumínio (bayerita) (PEDROSA, 2012).

2.1.4. Rejeitos de Mineração de Bauxita

Existem dois tipos de resíduos produzidos pelas atividades mineradoras, os estéreis e os rejeitos. No decapeamento da jazida são produzidos materiais sem nenhum valor econômico, denominados estéreis; estes são dispostos, geralmente, em pilhas e utilizados algumas vezes no próprio sistema de extração do minério. Os rejeitos são resultantes do

processo de beneficiamento do minério contém elevado grau de toxicidade, além de partículas dissolvidas e em suspensão, metais pesados e reagentes (LOZANO, 2006).

Os rejeitos de mineração são em geral misturas com elevada presença de água, isto por causa do processo de lavagem que tem por objetivo separar a fração fina da fração grossa que contém na maioria das vezes o minério de interesse. O rejeito é comumente lançado por via hidráulica para estruturas de armazenamento sejam diques ou barragens (TINOCO, 2017).

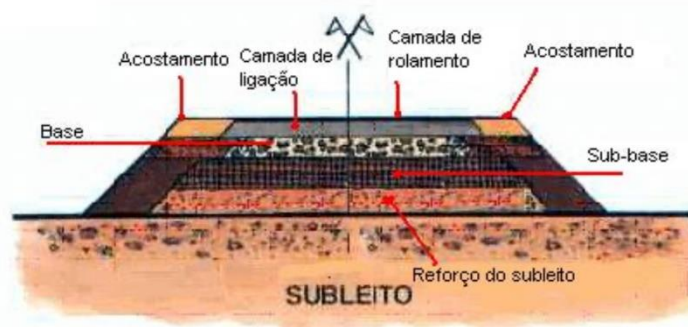
2.2. O PAVIMENTO

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem (BERNUCCI, 2007).

Segundo Balbo (2007), a pavimentação tem como meta propiciar um tráfego confortável e seguro, com estruturas e materiais capazes de suportar os esforços decorrentes da ação do tráfego combinados com as condições climáticas, a um mínimo custo, ou seja, buscando, sempre que possível, o aproveitamento de materiais locais para as obras, garantindo um bom desempenho em termos de custos operacionais e de manutenção ao longo dos anos de serviço desta infraestrutura social.

O pavimento possui as seguintes camadas: revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito (Figura 1). Algumas camadas podem ou não existir, entretanto para que a estrutura seja considerada pavimento é necessário que tenha o revestimento e subleito (BALBO, 2007).

Figura 1 – Esquema de uma estrutura de pavimento e suas camadas



Fonte: Bernucci et al, 2007

O revestimento é a camada tanto quanto possível impermeável que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, tem a função de receber as cargas, tanto estáticas quanto dinâmicas sem sofrer grandes deformações plásticas ou elásticas. Portanto, necessita-se ser composto de materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal (DNIT, 2006).

A base e a sub-base são as camadas que tem a função de aliviar as pressões sobre as camadas de solo inferiores e podem desempenhar um papel importante na drenagem superficial dos pavimentos (BERNUCCI et al., 2007).

O reforço de subleito e o subleito são as camadas mais inferiores. O subleito é o terreno de fundação do pavimento, é uma camada constituída por material natural compactado. Como os esforços sobre a superfície são aliviados em sua profundidade, necessita-se ter maior preocupação com as camadas superiores. O reforço de subleito é uma camada não obrigatória, entretanto, caso exista, é composto de solo com pequena resistência aos esforços verticais que ocorrem sobre a superfície, necessita-se de uma camada de melhor qualidade de solo que do subleito (BERNUCCI et al., 2007).

2.2.1. Tipos de Pavimento

De acordo com a rigidez da estrutura, o pavimento pode ser classificado em três tipos: flexível, rígido e semirrígido.

De acordo com DNIT (2006) o pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.

O pavimento rígido é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Por fim, o pavimento semirrígido é caracterizado por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica (DNIT, 2006).

2.2.2. Materiais para Camada de Base e Sub-base

De acordo com DNIT (2006) os materiais utilizados nas camadas de base e sub-base de pavimentos são, de um modo geral, materiais granulares estabilizados granulometricamente para melhor arranjo de partículas e, conseqüentemente, melhor resposta de comportamento mecânico ou, ainda, estabilizados quimicamente quando se tem a necessidade de diminuir a suscetibilidade deste material à água (expansão) ou elevação de sua resistência.

Nessa seção são descritos, de maneira sucinta, as características físicas e de comportamento mecânico dos materiais comumente utilizados em camadas de bases e sub-bases de pavimentos.

2.2.2.1. Brita Graduada Simples (BGS)

É um dos materiais mais utilizados em camadas de base e sub-bases de pavimentos, introduzido no Brasil na década de 1960 quando houve um crescimento significativo da malha pavimentada no país (BERNUCCI et al., 2007).

Ainda segundo Bernucci et al. (2007) esse material apresenta distribuição granulométrica bem graduada, com agregados de diâmetro máximo de até 38 mm e finos (passante na peneira de 0,075 mm) entre 3 e 9%, conferindo intertravamento adequado dos grãos e, com isso, boa resistência do material, com índice de suporte Califórnia (ISC) da ordem de 60% até maiores que 100% e módulo de resiliência médio de 300 Mpa.

2.2.2.2. Brita graduada tratada com cimento (BGTC)

De acordo com Balbo (1993), entende-se por brita graduada tratada com cimento (BGTC) a mistura de agregados britados, que apresentem distribuição granulométrica descontínua e bem graduada, com cimento que tem a finalidade de modificar a forma de resposta destas britas compactadas, frente às ações externas, resposta esta que passa a ser resultante não apenas da forma de contato entre seus grãos, mas também das ligações existentes entre os mesmos e a pasta de cimento endurecida.

Este tipo de material teve seu uso introduzido no Brasil no final da década de 1970 e, atualmente, tem sido bastante utilizado para vias de alto volume de tráfego. Geralmente, é empregada como material de base em pavimentos com revestimentos betuminosos, mas também pode ser utilizada como base de pavimentos intertravados ou sub-base de pavimentos de concreto, ou ainda como sub-base de pavimentos invertidos (BERNUCCI et al., 2007).

As normas correntes indicam faixas granulométricas semelhantes às indicadas para a brita graduada simples (BGS), porém, no caso da BGTC, emprega-se adição de cimento na ordem de 4% em massa e tem-se como exigência o valor médio de resistência à compressão aos 7 dias dentro do intervalo de 3,5 a 8,0 MPa.

Em termos de comportamento mecânico frente às solicitações cíclicas, geralmente o módulo de resiliência destes materiais apresenta valores da ordem de 7000 MPa, aos 28 dias (BERNUCCI et al., 2007).

2.2.2.3. Solo-cimento

A norma DNIT 143/2010-ES (DNIT, 2010b), define solo-cimento como material proveniente da mistura de solo, cimento e água, em proporções previamente determinadas

por processo próprio de dosagem em laboratório, de forma a apresentar determinadas características de resistência e durabilidade.

De acordo com Bernucci et al. (2007), o solo-cimento foi largamente empregado no Brasil na década de 1960, quando as obras de pavimentação chegaram às regiões onde havia escassez de pedreiras para a produção de agregados.

As normas NBR 11798 (ABNT, 2012) estabelece a graduação para solos com granulometria de 100% passante na peneira de abertura de 3" (76mm), enquanto que o DNIT (2010b) estabelece esse limite na peneira de abertura 2,5" (63,5mm). As especificações estabelecem, ainda, valores máximos de limite de liquidez e índice de plasticidade de 40% e 18%, respectivamente. Em geral são indicadas porcentagens, em massa, para adição de cimento variando de 5 a 7% (BERNUCCI et al., 2007).

Cabe ressaltar que o solo deve apresentar certa proporção de areia, pois caso tenha elevada quantidade de argila em sua composição, vai demandar o uso de alto teor de cimento o que, além de onerar a mistura, pode gerar a ocorrência de elevado trincamento por retração (BERNUCCI et al., 2007).

De acordo com as normas e especificações a resistência à compressão do solo-cimento, deve ser de 2,1 MPa aos 7 dias, podendo chegar até 8,0 MPa, dependendo do teor de cimento e da natureza do solo empregados.

Com vistas a rigidez deste tipo de material, espera-se obter um módulo de resiliência com valores que variam desde 3000 MPa, aos 7 dias, até maiores que 10000 MPa, aos 91 dias. Aqui também dependentes do teor de cimento e do tipo de solo empregados (BERNUCCI et al., 2007).

2.2.2.4. Solo melhorado com cimento

O solo melhorado com cimento, assim como o solo-cimento, é o material resultante da mistura do solo natural com o cimento, porém, segundo Balbo (2007), a distinção mais clara entre os dois materiais pode ser feita pela quantidade de cimento empregada nas misturas.

Enquanto o solo-cimento emprega teores de cimento da ordem de 7%, o solo melhorado com cimento utiliza, de acordo com recomendação da norma DNIT 142/2010-ES (DNIT, 2010b), teores de cimento que variam entre 2% a 4%.

O principal objetivo do solo melhorado com cimento é conferir ao solo uma estabilização de modo a torná-lo menos expansível e menos suscetível à ação da água (BALBO, 2007).

2.2.2.5. Solo-cal

Solo-cal é a mistura artificial de solo com cal em proporções estabelecidas por dosagem experimental que, quando adequadamente compactada, deve apresentar estabilidade e durabilidade elevadas (DER-SP, 2006).

Trata-se, então, de uma estabilização química que tem como objetivo melhorar as características do solo, seja pelo enrijecimento, pela melhora na trabalhabilidade ou pela redução da expansão (BERNUCCI et al., 2006).

Os efeitos da adição de cal nas propriedades do solo ocorrem por reações que podem ser divididas em duas categorias: imediatas, ou “antes da cura”, e de longo prazo, ou “após a cura” (LITTLE, 1995 apud SILVA, 2014).

Segundo Boscov (1990) apud SILVA (2014), as reações imediatas ocorrem na superfície das partículas (reações iônicas), modificando as forças e arranjo entre elas. Esta modificação vai formar uma estrutura floculada na qual os microagregados se comportam como grãos, tornando o solo mais friável e trabalhável, e menos plástico, o que vai gerar um aumento no teor de umidade ótimo e uma diminuição da massa específica aparente seca máxima. As reações de longo prazo compreendem a reação pozolânica e a carbonatação, sendo esta última considerada indesejável, pois os carbonatos de cálcio e magnésio são cimentos fracos e que retardam a ocorrência da reação pozolânica, por esse motivo certos cuidados devem ser tomados para evitá-la.

De acordo com Little (1995) apud SILVA (2014), as reações de longo prazo são muito mais complexas e altamente influenciadas pelas condições do solo e por suas propriedades mineralógicas. Entretanto, a maioria dos solos argilosos apresenta reatividade pozolânica e quando misturados com a cal geram um ganho significativo de resistência, devido ao desenvolvimento de uma matriz cimentada entre suas partículas.

A sílica e a alumina presentes na argila tornam-se solúveis em um meio com pH elevado: como o pH da água saturada com a cal é de 12,5 a 25°C, o sistema solo-água-cal apresenta pH alcalino suficiente para solubilizar a sílica e a alumina e possibilitar a ocorrência da reação pozolânica (LITTLE, 1995 apud SILVA, 2014). Estes elementos solubilizados irão reagir com o cálcio presente na cal formando os silicatos, aluminatos e alumino-silicatos de cálcio hidratados que são produtos com propriedades cimentantes (BOSCOV, 1990 apud SILVA, 2014).

A especificação do DER-SP (2006) estabelece que o teor mínimo de cal a ser adicionado é de 3%, mas em geral são utilizados teores que variam de 4 a 10% em massa. A especificação estabelece, ainda, que a mistura deve apresentar ISC mínimo de 60% e

expansão máxima de 0,5% para o uso em camadas de base, e ISC mínimo de 30% e expansão máxima de 1,0% para o uso em camadas de sub-base, sendo que em ambos os casos a energia de compactação referida é a intermediária.

Com relação à rigidez, o módulo de resiliência dependerá da natureza do solo e do teor de cal empregado, porém espera-se que este tipo de mistura apresente valores da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos para o solo-cimento.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa foram moldados corpos de prova com rejeito proveniente da extração de bauxita com adição de Cal Hidratada, sobre os quais foram realizados ensaios para verificação do comportamento mecânico, por meio de resistência à compressão simples após 7, 28 e 91 dias de cura, o que permitiu avaliar a ocorrência da reação pozolânica no material e assim proporcionar ganho de resistência com o processo de cura.

3.1. MATERIAIS

Nesta pesquisa utilizou-se resíduo proveniente da extração de bauxita, denominado de “RB” obtido da classificação da bauxita lavrada nas proximidades da unidade industrial de Miraf, cedida pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA).

Para estabilização do resíduo e verificação de seu potencial para ocorrência de reação pozolânica foi adicionada cal hidratada do tipo CHIII nos teores de 5,0% (RB5) e 8,0% (RB8) em massa.

3.2. MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizados ensaios de granulometria e massa específica para a caracterização física do resíduo RB. Foram, ainda, efetuados ensaios de compactação na energia Proctor modificada, para determinação do ponto ótimo de compactação (massa específica aparente seca máxima e umidade ótima), tanto do resíduo puro (RB) quanto das misturas que empregaram 5,0% e 8,0% de cal em sua composição (RB5 e RB8).

Além destes, realizou-se ensaios de resistência à compressão simples para a avaliação do comportamento mecânico das misturas de resíduo e cal e de que maneira a adição de cal interferiu no ganho de resistência com o processo de cura.

Vale ressaltar que todos os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentos da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Apresentam-se, nos subitens 3.2.1 a 3.2.3 a descrição dos métodos de ensaios e procedimentos empregados na pesquisa experimental.

3.2.1. Caracterização Física

Existe uma vasta gama de curvas granulométricas para rejeitos provenientes de diversas operações de extração de minério. As granulometrias dos rejeitos podem variar entre os diâmetros das areias e das argilas (TINOCO, 2017).

Para a caracterização do RB, inicialmente realizou-se ensaio de granulometria conforme procedimento indicado na norma NBR 7181 (ABNT, 2016). Após a realização da granulometria foram realizados os ensaios para determinação de sua massa específica, conforme a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009).

3.2.2. Compactação Proctor

Sobre o material puro (RB), bem como sobre as misturas com cal (RB5 e RB8) realizou-se ensaio de compactação Proctor, conforme procedimento indicado na norma NBR 7182 (ABNT, 2016), utilizando a energia modificada nos três ensaios.

Na compactação, as quantidades de partículas e de água permanecem constantes; o aumento da massa específica corresponde à eliminação de ar dos vazios. A redução do atrito pela água e os canalículos de ar permitem uma massa específica maior quando o teor de umidade é maior. A partir de um certo teor de umidade, a compactação não consegue mais expulsar o ar dos vazios pois o grau de saturação já é elevado e o ar está ocluso (envolto por água). Há, portanto, para a energia aplicada, um certo teor de umidade, denominado umidade ótima, que conduz a uma massa específica seca máxima, ou uma densidade seca máxima (PINTO, 2006).

3.2.3. Resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples, conforme a NBR 12253 (ABNT, 2012) foram realizados sobre os corpos de prova, com dimensões de 100mm X 200mm, das misturas RB5 e RB8, moldados no ponto ótimo obtido na energia modificada, nas idades de cura de 7, 28 e 91 dias, sendo 3 corpos de prova para cada mistura em cada idade de cura avaliada, totalizando 18 corpos de prova.

Após a compactação, os corpos de prova foram acondicionados em sacos plásticos e armazenados em câmara úmida até que atingissem a idade de ensaios quando então foram retirados e submetidos a realização do ensaio.

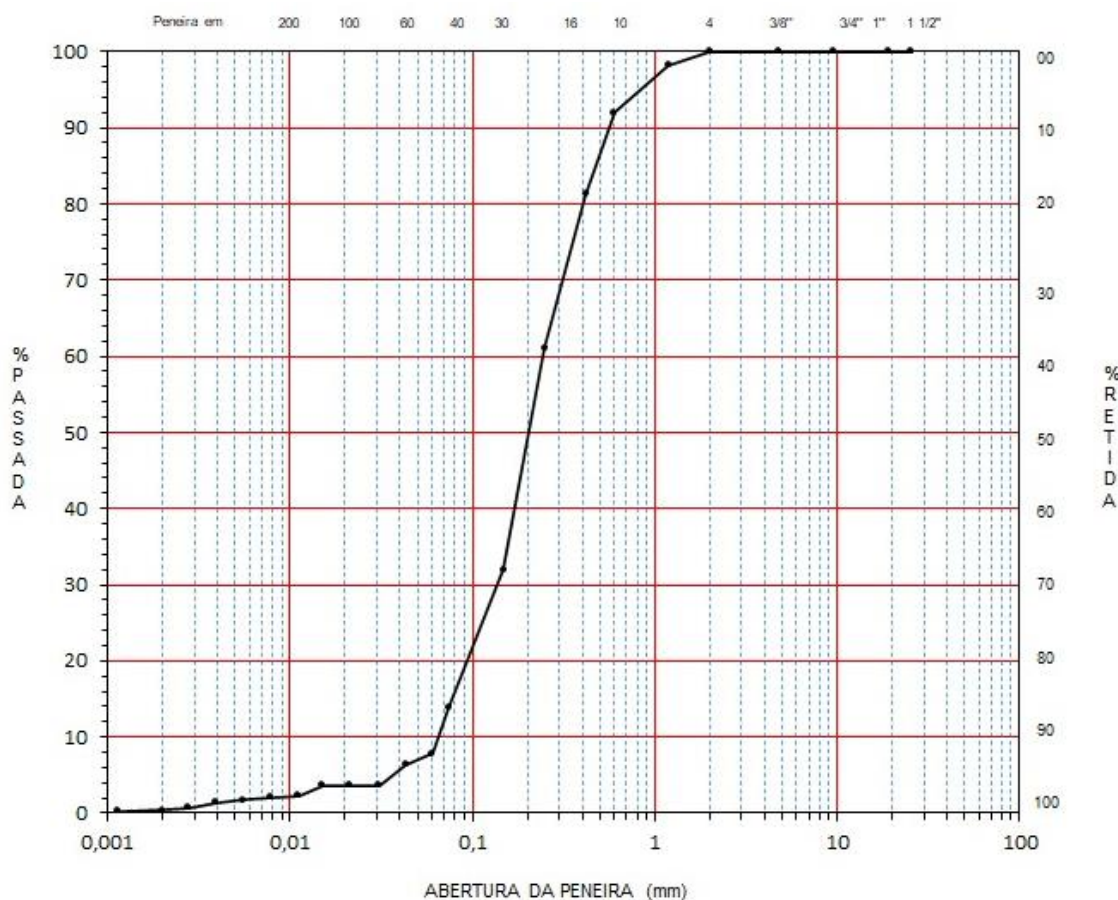
4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Neste subitem são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados durante a pesquisa experimental, bem como as discussões a respeito dos mesmos.

4.1. Caracterização Física

Como mencionado anteriormente, para a caracterização do RB foram realizados ensaios de granulometria, cujo resultado é apresentado na Figura 2, e ensaio de massa específica dos grãos.

Figura 2 – Granulometria do RB



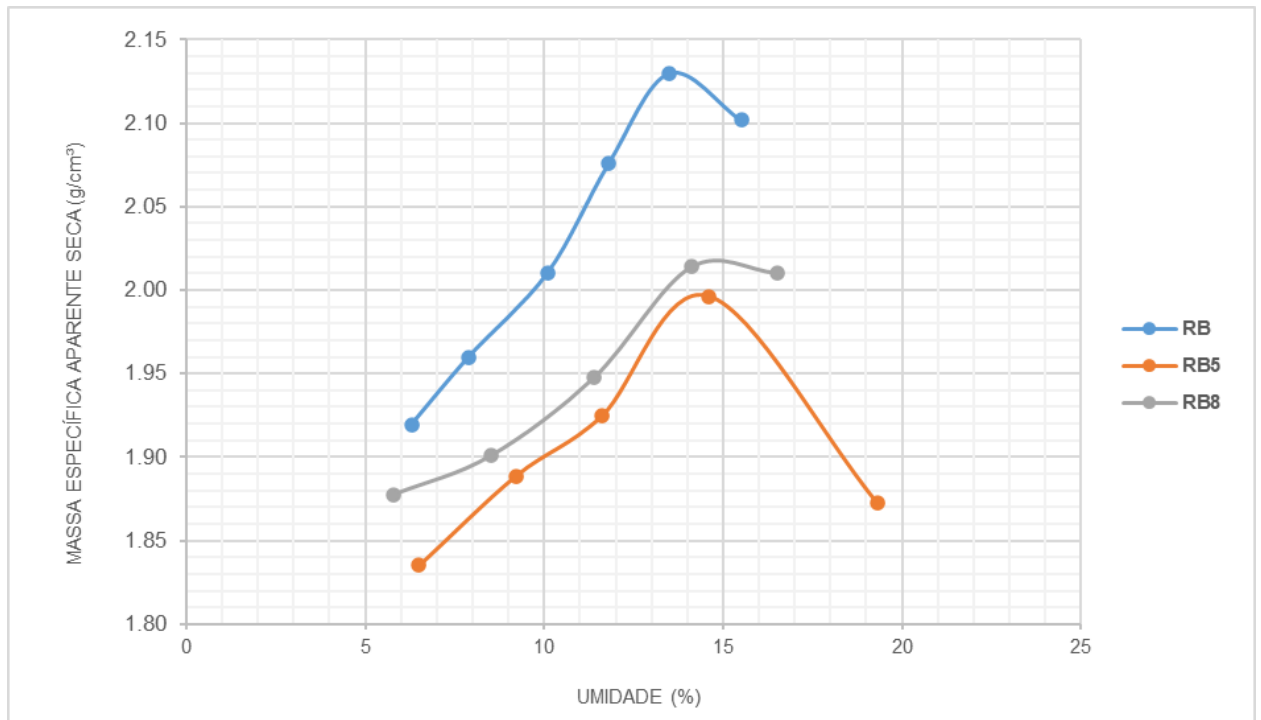
Fonte: O Autor

Após a análise granulométrica, realizou-se o ensaio de massa específica aparente, conforme descrito no subitem 3.2.1. A massa específica dos grãos obtida para o RB foi de 3,65 g/cm³.

4.2. Compactação Proctor

As curvas de compactação obtidas no ensaio Proctor na energia modificada, para o resíduo puro (RB) e também para o resíduo com adição de 5,0% e 8,0% de cal hidratada (RB5 e RB8), citado no subitem 3.2.2, são apresentadas na Figura 3.

Figura 3 – Ensaio de Compactação Proctor



Fonte: O Autor

Na Tabela 2, estão apresentados os resultados para a umidade ótima ($w_{ótima}$) e a massa específica aparente seca máxima (ρ_d máxima) obtidas nos ensaios realizados.

Tabela 2. Umidade ótima e massa específica aparente seca máxima para RB, RB5 e RB8

Material	$w_{ótima}$ (%)	ρ_d (g/cm³)
RB	13,5	2,13
RB5	14,6	2,00
RB8	14,8	2,02

Legenda: RB: Rejeito de Bauxita; RB5: Rejeito de bauxita com adição de 5,0% em massa de cal CHIII; RB8: Rejeito de bauxita com adição de 8% em massa de CHIII.

4.3. Resistência à Compressão Simples

Na Tabela 3 são apresentados as médias e os desvios padrões dos resultados obtidos nos três corpos-de-prova ensaiados à compressão simples, para o material com adição de 5,0% e 8,0% de cal nas três idades de cura estudadas.

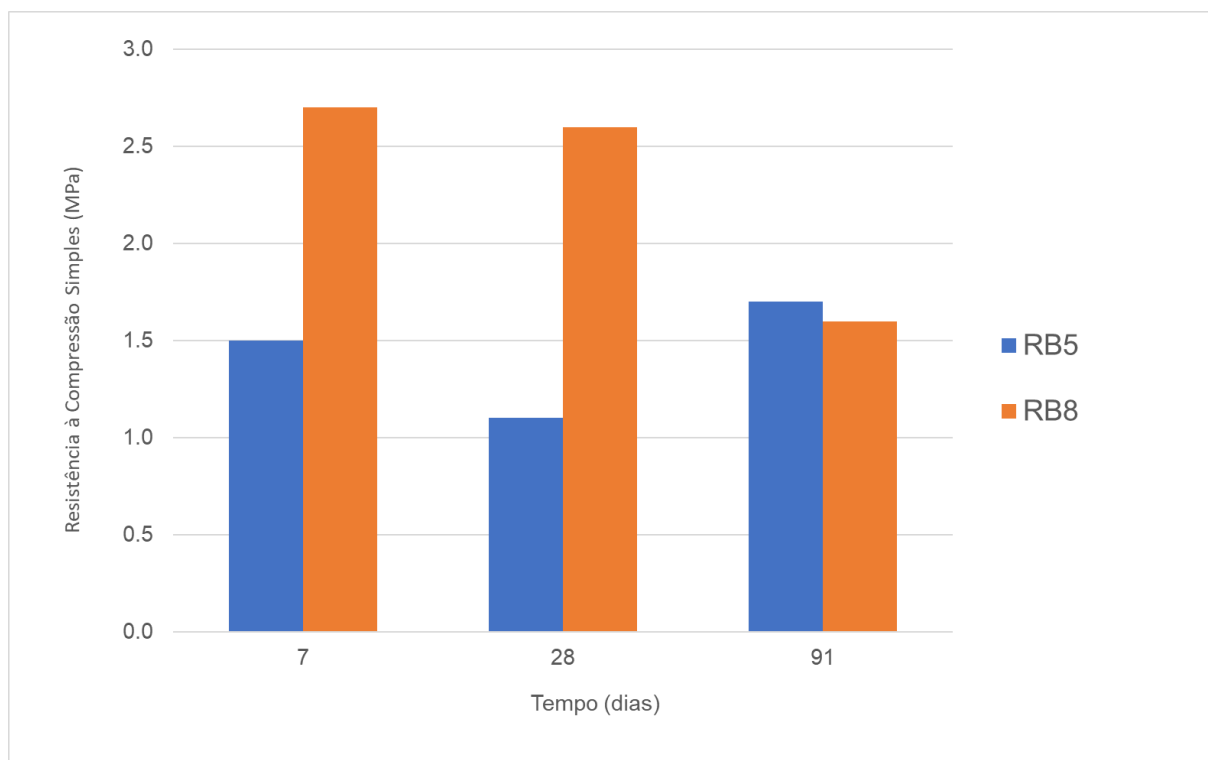
Tabela 3 – Resultados da média de resistência à compressão simples

Material	Idade de cura (dias)	Resistência à compressão simples média (MPa)	Desvio Padrão
RB5	7	1,5	0,1
	28	1,1	0,0
	91	1,7	0,2
RB8	7	2,6	0,4
	28	2,6	0,2
	91	1,6	0,3

Legenda: RB: Rejeito de Bauxita; RB5: Rejeito de bauxita com adição de 5% de CHIII em massa; RB8: Rejeito de bauxita com adição de 8% de CHIII em massa.

A Figura 4 apresenta os resultados médios de resistência à compressão simples, comparativo entre o RB com adição de 5,0% e 8,0% em massa nas três idades de cura estudadas (7, 28 e 91 dias).

Figura 4 – Resultados Resistência à Compressão Simples Média



Fonte: O Autor

Observando os resultados obtidos para os ensaios de resistência a compressão simples, verifica-se que os resultados obtidos para o RB8 dos 7 para os 28 dias de cura mantiveram-se estáveis, enquanto que para o RB5 houve aparente decréscimo de sua resistência à compressão simples.

Porém quando comparados as 3 idades de cura, verifica-se que o comportamento mecânico do RB5 quanto a compressão apresentou elevação no resultado, passando de 1,5MPa aos 7 dias para 1,5MPa aos 91 dias de cura o que, embora represente melhora no comportamento mecânico do material, essa melhora não é significativa de modo que não atinge o valor mínimo de resistência à compressão simples de materiais cimentados, do tipo solo-cimento, por exemplo que deve ser de 2,1MPa (ABNT, 2012).

Para o RB8, observa-se perda de resistência com o processo de cura, o que pode ter sido ocasionado por reações químicas que podem ter ocorrido entre a cal hidratada e os compostos do resíduo da extração de bauxita (RB), prejudicando a ocorrência da reação pozolânica e, assim, fragilizando a microestrutura dos corpos de prova ensaiados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos no desenvolvimento desta pesquisa observa-se que o resíduo da produção de bauxita estudado (RB) não apresentou comportamento mecânico adequado para aplicação em camadas de pavimentos, seja puro, seja com os teores de cal hidratada estudados (RB5 e RB8);

Porém este resultado não inviabiliza sua utilização, já que nesta pesquisa foram utilizados um pequeno número de corpos de prova, além do fato de não haver tempo hábil para a repetição dos ensaios, de modo a confirmar os resultados obtidos.

Assim, recomenda-se para pesquisas futuras, a repetição dos ensaios de resistência à compressão simples no RB5 e RB8 considerando a dosagem estudada no presente trabalho e, paralelamente, a realização de ensaios de análises químicas para verificar se os minerais constituintes do RB podem ter prejudicado a ocorrência de reação pozolânica e, com isso, comprometido o comportamento mecânico dos materiais estudados.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11798**: Materiais para base de solo-cimento – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253**: Solo-Cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

BERNUCCI, L.B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2007. 501p.

BALBO, J.T. **Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação nos pavimentos semi-rígidos**. 1993. 181p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro**: principais substâncias metálicas. Brasília (DF), 2017.

CARVALHO, A. **As Bauxitas no Brasil: Síntese de um programa de pesquisa**. Tese de Livre Docência. 1989. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo. 134p

CONSTANTINO, Vera R. Leopoldo et al. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático**. Quím. Nova, Maio 2002, vol.25, no.3, p.490-498. ISSN 0100-4042.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/005A**: Sub-base ou base de solo cal. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 142/2010**: Pavimentação – Base de solo melhorado com cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 143/2010**: Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **IPR-719**: Manual de pavimentação. Rio de Janeiro, 2006.

GOW, Neil N.; LOZEJ, Gian Paolo. **Bauxite**. Geoscience Canada, v. 20, n. 1, 1993.

HIGH – TECH. (1998). **Ceramics**. ETHZ LATSIS SYMPOSIUM.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Sistemas de Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. Brasília/DF: IBRAM, 2012. 7ª edição. 68p.

LOZANO, F.A.E. **Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando Método da Análise Hierárquica**. 2006. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MÁRTIRES, R.A.C. 2009. Alumínio. In: Rodrigues A.F.S. (coord.). **Economia Mineral do Brasil**. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Brasília, p. 179-197.

TINOCO, Carla Palomino. Caracterização geomecânica de um rejeito de mineração de bauxita. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PEDROSA, Giovani José. **Modelação física da disposição de rejeitos de bauxita por meio de diques-testes**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 2006. Oficina de Textos, São Paulo.

SILVA, Patrícia Barboza da. **Estabilização de misturas de resíduos sólidos de demolição e da indústria cerâmica para uso em camadas de pavimentos viários**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Sampaio J.A., Andrade M.C. de., Dutra A.J.B. 2008. Bauxita. In: Luz A.B. & Lins F.A.F. (eds.). 2008. **Rochas & Minerais Industriais – Usos e Especificações**. CETEM-MCT – Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2ª ed., p. 311-337

UNITED NATIONS. UNITED STATES OF AMERICA. World Commission on Environment and Development. **Report 42/187**. New York, 1987.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL (ONU BR). **A ONU e o meio ambiente**. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Presbiteriano Mackenzie pela bolsa de Iniciação Científica do aluno, Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM) e a Escola de Engenharia da UPM pela disponibilização de materiais, de seus laboratórios, bem como de seus técnicos para a realização desta.

Contatos: danielcoelho.99@outlook.com e patricia.silva1@mackenzie.br