

# Caracterização física do resíduo de mineração de fosfato no Alto do Paranaíba (MG)

*Physical characterization of phosphate mining waste in Alto do Paranaíba (MG)*

GISELE FIGUEIREDO SANCHES

Discente do curso de Engenharia Civil – UNIPAM  
E-mail: giselesanches@unipam.edu.br

SHEILLA PEREIRA VIEIRA

Professora orientadora – UNIPAM  
E-mail: sheilapv@unipam.edu.br

---

**Resumo:** Na mineração, existe um conjunto de operações denominado como lavra, atividade na qual são gerados grandes volumes de massas de materiais, sendo eles extraídos ou movimentados. Durante esse processo, são gerados os resíduos estéreis e os rejeitos. A disposição do estéril geralmente é feita sob a forma de pilhas, e a construção destas corresponde a um valor significativo nos custos de uma empresa de mineração. A pesquisa teve como objetivo analisar as características físicas do estéril oriundo da mineração de fosfato, através da realização dos ensaios normatizados: análise granulométrica por sedimentação, massa específica, limites de Atterberg (plasticidade e liquidez), compactação Proctor.

**Palavras-chave:** Mineração. Fosfato. Estéril. Construção civil.

**Abstract:** In mining, there is a set of operations called mining, an activity in which large volumes of material masses are generated, being extracted or moved. During this process, sterile waste and tailings are generated. The disposal of waste is generally done in the form of piles, and the construction of these corresponds to a significant amount in the costs of a mining company. The research aimed to analyze the physical characteristics of the waste arising from phosphate mining, through standardized tests: granulometric analysis by sedimentation, specific mass, Atterberg limits (plasticity and liquidity), Proctor compaction.

**Keywords:** Mining. Phosphate. Sterile. Construction.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração é um importante setor da cadeia produtiva e econômica nacional. Nos últimos anos, têm sido discutidos exaustivamente os rumos desses segmentos quanto à segurança de suas operações, principalmente sobre a deposição de rejeitos em barragens.

Durante a atividade de mineração, são gerados grandes volumes de massas de materiais, sendo eles extraídos ou movimentados. Através dessa atividade, são obtidos dois resíduos sólidos: os estéreis e rejeitos. A quantificação desses resíduos depende do processo utilizado na extração do minério, da concentração da substância do mineral na

rocha matriz e da localização da jazida em relação à superfície; além disso, a complexidade, a diversidade de operações e a tecnologia utilizada no processo de extração e beneficiamento dos minerais dificultam os dados consistentes, pois as informações estão dispersas entre várias agências governamentais (CAVALCANTE; SILVA; VIANA, 2012).

O estéril é originado do decapeamento, ou seja, são resíduos em que não houve processo e são removidos da área da lavra para permitir livre acesso para a exploração do minério. É composto por partículas de rochas e de solo com diferentes granulometrias, além de ar, água e matéria orgânica. Não possui valor econômico, mas necessita ser transportado e estocado. A disposição do estéril geralmente é feita sob a forma de pilhas e a construção delas corresponde a um valor significativo nos custos de uma empresa de mineração (PETRONILHO, 2010).

Em 2017, foram geradas 272.248.395,503 toneladas de estéril, um valor menor que os anos anteriores, mas ainda é bem expressivo. Todo esse material estéril é movimentado e disposto em forma de pilhas, depósitos ou preenchimento de cavas exauridas. Por falta da disponibilidade de áreas, pelo limite da concessão do empreendimento, as mineradoras veem enfrentado grandes problemas de estocagem desses materiais, com isso sendo necessária a implementação de alternativa do uso desse material estéril (SEERIG, 2019).

O presente estudo visa qualificar e quantificar as características físicas e mecânicas do estéril da mineração de fosfatos de uma mineradora localizada na região do Alto do Paranaíba (MG).

## 1.1 OBJETIVOS

O estudo teve como objetivo geral compreender as características físicas do resíduo oriundo de uma mineração de fosfato localizada no Alto do Paranaíba (MG). Para que o objetivo geral fosse alcançado, foram traçados os seguintes objetivos específicos: (i) realizar a caracterização física do resíduo através dos ensaios laboratoriais: análise granulométrica, massa específica, limites de consistência e compactação Proctor; (ii) comparar os resultados de caracterização física e mecânica com parâmetros normatizados existentes para solos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A investigação realizada neste trabalho é pertinente, uma vez que há poucos estudos destinados à caracterização de materiais como estéril para uma possível viabilidade desse material. Nesse sentido, o presente trabalho justifica-se em função de caracterizar e levantar dados físicos e mecânicos do estéril da mineração de fosfato, de origem de uma mineradora localizada no Alto do Paranaíba (MG), de modo a proporcionar análise da viabilidade técnica para aplicação futura do resíduo e consequentemente reduzir o volume de estocagem, diminuindo, assim, a área de degradação ambiental.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentam-se a seguir conceitos teóricos a respeito do processo de mineração e extração do fosfato, métodos de estocagem de estéreis e sistema de decomposição de rejeitos.

### 2.1 MINERAÇÃO

Segundo a IBRAM (2016), minerar compreende o conjunto das atividades de pesquisar, mensurar, extrair, processar, de modo a transformar as commodities em benefícios para economia e sociedade. Na Figura 1, há uma vista esquemática de uma mineradora.

**Figura 1:** Vista esquemática de mineradora



Fonte: IBRAM, 2016.

No mundo, a mineração é considerada economicamente uma das principais atividades do setor produtivo. Também é sabido que esse importante setor da economia é responsável por diversos impactos socioambientais (GOMES; COTA; NASCIMENTO, s/d).

#### 2.1.1 História da mineração de fosfato

O fosfato é usado principalmente na produção de fertilizantes. Segundo Souza e Fonseca (2010), a única forma de extração do fósforo de maneira viável são as rochas fosfáticas, que se encontram depositadas em torno de 85% em regiões sedimentares (localizadas nos Estados Unidos, sudeste do México, Marrocos e Noroeste do Saara e Oriente Médio) e 15 % de origens ígneas (localizadas na África do Sul, Rússia, Finlândia e Brasil, entre outros). Em função do hemisfério norte ter sido privilegiado com grandes concentrações de tais rochas, são esses os países também tradicionais na extração, processamento e exportação.

No Brasil, a indústria da mineração de fosfato tem recebido destaque econômico em função de o fosfato ser um dos principais insumos na fabricação de fertilização. O

aumento da capacidade produtiva permitirá um maior equilíbrio na balança comercial brasileira em função de grande parte desse insumo ser atualmente importado. No ano de 2007, mineradoras mineiras contribuíram, respectivamente, com 53,7% e 58,9%, da oferta interna, dos insumos, ácido fosfórico e sulfúrico para fertilizantes; já o Estado de Goiás disponibilizou 28,8% e 28,0% de ambos; o Estado de São Paulo, com 17,5% de participação na produção doméstica de ácido fosfórico (GOMES; COTA; NASCIMENTO, s/d).

De acordo com o Projeto serradosalitre (2019), a região de Serra do Salitre conta com importante complexo minero industrial, que é classificado como um projeto de classe mundial em função dos investimentos que giram em torno de 2,6 bilhões de reais e capacidades produtivas conforme abaixo:

- ✓ 1,2 Milhão de toneladas/ano de concentrado fosfático;
- ✓ 950 mil toneladas/ano de fertilizantes granulados;
- ✓ 1 milhão de toneladas/ano de ácido sulfúrico;
- ✓ 250 mil toneladas/ano de ácido fosfórico.

Esse projeto irá permitir ao país reduzir a importação de 950 mil toneladas por ano de fertilizantes fosfatados.

## 2.2 ESTÉRIL

Através da atividade de mineração a céu aberto, retira-se um grande volume de estéril, o qual não é aproveitável economicamente na atualidade. Geralmente é estocado sob a forma de pilhas. Sendo assim, é necessário que se estabeleça uma área adequada para a disposição do material; para isso, devem ser realizados estudos que visem à viabilidade técnica e econômica para o processo produtivo ser mais efetivo. No entanto, deve-se dá importância ao volume de estéril retirado no decorrer da operação de lavra, à área de armazenamento e à distância média de transporte (COSTA, 2017).

O estéril, por conter diversos tamanhos nas partículas, dificulta o projeto de construção de depósitos para a sua disposição. As pilhas de estéril são constituídas por uma estrutura complexa, devido ao grande volume de material retirado na mina, e requerem áreas maiores para a sua construção. Essas estruturas podem sofrer de pequenos a grandes colapsos se submetidas a abalos por tremores de terra, caso o sistema de drenagem for insuficiente ou se ocorre a má compactação do material que as constitui. Desse modo, são de extrema importância os estudos geotécnicos, assim como os estudos hidrológicos e hidrogeológicos das pilhas de estéril, pois podem acarretar problemas relacionados à saturação do maciço, devido aos sistemas inadequados de drenagem, e às características de resistência do material de fundação e do estéril, podem gerar grandes deformações. Essas deformações, por sua vez, podem aumentar o custo relativo à manutenção do depósito, além de causar grande impacto ambiental (SALIBA, 2007).

De acordo com Petronilho (2010), a construção de um depósito de estéril, além de ser um projeto de alto custo, gera um grande impacto ambiental. Para a elaboração do projeto de uma pilha de estéril, devem-se levar em conta algumas variáveis importantes na elaboração, como volume de estéril retirado no processo da operação de lavra, localidade para construção do depósito, capacidade de armazenamento da

possível área para disposição, distâncias de transporte, condições de acesso, características da área (relevo, fundação, topografia, etc.), condições hídricas locais e os impactos que podem ser gerados.

Segundo Costa (2017), drenagem, proteção vegetal, retenção de finos gerados por carreamento de sólidos durante e após a formação da pilha, manutenção ao longo dos anos e transporte são as atividades que geram os maiores gastos econômicos durante o processo na disposição de estéril.

De acordo com Seerig (2019), foi levantada, nos anos de 2010 a 2018, uma somatória do total de 4.490.733.411,13 toneladas de Resíduos Sólidos de Mineração ao longo, sendo que só de estéril foi gerada uma somatória de 2.866.397.527, 53. A Tabela 1 mostra o levantamento do volume de estéril e rejeito no estado de Minas Gerais, levando em conta toda a extração de bens minerais no estado por ano.

**Tabela 1:** Levantamento de rejeitos e estéreis 2010 a 2018 no estado de Minas Gerais

ANO	ESTÉRIL (t)	REJEITO (t)	TOTAL(t)
2017 - 2018	272.248.395,503	289.911.703,261	562.160.098,764
2016 - 2017	293.882.952,916	172.882.183,068	466.765.135,984
2015 - 2016	363.306.236,217	242.357.728,410	605.663.964,627
2014 - 2015	367.595.451,000	200.074.420,000	567.669.871,000
2013 - 2014	379.095.050,975	151.618.473,050	530.713.524,025
2012 - 2013	501.189.419,440	170.118.179,790	671.307.599,230
2011 - 2012	428.751.253,202	184.457.533,129	613.208.786,331
2010 - 2011	260.328.768,273	212.915.662,894	473.244.431,167

Fonte: Seerig, 2019.

Analisando a Tabela 1, nota-se que, a partir de 2012, houve diminuição do volume total de estéril e rejeito gerados, mas vale ressaltar que houve diminuição da produção de minerais nesses anos. Porém, o valor de 272.248.395,503 de estéril em 2017 ainda é bem expressivo. Todo esse material estéril é movimentado e disposto em forma de pilhas, depósitos ou preenchimento de cavas exauridas. Por falta da disponibilidade de áreas, pelo limite da concessão do empreendimento, as mineradoras vêm enfrentando grandes problemas de estocagem desses materiais, sendo necessária a implementação de alternativa do uso desse material estéril (SEERIG, 2019).

### 2.3 REJEITOS FOSFÁTICOS

Segundo Santos, Sobral e Araújo (2002), os rejeitos são provenientes do processo de concentração; na etapa de beneficiamento do minério, aproximadamente 85% da massa alimentada na planta irão se tornar rejeitos no final do processo.

Para Bittar (2006), os rejeitos gerados são inicialmente são de três tipos:

- ✓ Origem da flotação: ciclados e utilizados nas construções das barragens;
- ✓ Magnéticos: oriundos da etapa de concentração magnética;
- ✓ Lamas: depositadas nos reservatórios.

### 3 METODOLOGIA

A coleta de amostras é considerada fator crítico nos processos de análise. A depender do modo de se realizar a coleta do material, tem-se grande chance de influenciar os resultados do estudo. Nessa etapa, são apresentados todos os materiais e métodos que foram utilizados para a realização da pesquisa experimental. O material (estéril) fornecido por uma empresa de mineração, localizada no Alto do Paranaíba (MG), foi entregue embalado para evitar a perda de umidade e devidamente armazenado no quarto úmido de acordo com a norma ABNT NBR 6457:2016. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Análises Tecnológicas de Materiais de Construção do Centro Universitário de Patos de Minas.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTÉRIL

Para a caracterização física, foram realizados os ensaios de análise granulométrica (ABNT NBR 7181:2016), massa específica dos grãos de solo (NBR 6458:2016 – Anexo B), limite de liquidez (ABNT NBR 6459:2016), limite de plasticidade (ABNT NBR 7180:2016) e compactação Proctor (ABNT NBR 7182:2016).

##### 3.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica determinou-se pelas dimensões das partículas do solo e das proporções relativas em que se encontram na massa total do solo ensaiado. Foi utilizada a norma ABNT NBR 7181: 2016 - Solos – Análise Granulométrica. Essa análise foi realizada usando o método de peneiramento (Figura 2a) e sedimentação (Figura 2b).

**Figura 2:** ABNT NBR 7181 – “Solo – Análise granulométrica”

(a) peneiramento grosso



(b) sedimentação



Fonte: arquivo dos autores, 2020.

Após os ensaios, foram obtidos os valores do peneiramento grosso, sedimentação e peneiramento fino, para os devidos cálculos.

### 3.1.2 Massa específica

A massa específica é um dos principais índices qualitativos dos grãos e essa propriedade é influenciada por fatores como teor de impurezas, variedade e teor de água. Este ensaio foi realizado com o estéril, segundo o Anexo B da ABNT NBR 6458:2016, que determina a massa específica de grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm, pelo método do picnômetro (Figura 3).

**Figura 3:** Ensaio de massa específica pelo método do picnômetro.



Fonte: arquivo dos autores, 2020.

Foram anotadas a umidade das amostras ( $W$ ), a massa das amostras úmidas ( $M1$ ), a massa do picnômetro mais a água e amostra ( $M2$ ), a temperatura da água ( $T$ ) e, por último, a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência. Logo após foram feitos os cálculos para se achar a massa específica dos grãos.

### 3.1.3 Limite de liquidez

O limite de liquidez ( $LL$ ) é definido pela condição do solo onde seu percentual de água o deixa mais fluído (PINTO, 2006).

Para a determinação do limite de liquidez, utilizou-se do método padronizado por Arthur Casagrande. Através do teor de umidade em que o sulco se fecha com número de 25 golpes, sendo esta a resistência que o solo tem para se fechar, esse valor obtido é necessário para obtenção da reta de escoamento. Para a realização do ensaio, adotaram-se os procedimentos da norma ABNT NBR 6459: 2016. A Figura 4 mostra a execução do ensaio de casa grande.

**Figura 4:** Ensaio de Casagrande



Fonte: arquivo dos autores, 2020.

Feito o ensaio e suas repetições com umidades diferentes, obteve-se o teor de umidade correspondente a 25 golpes, resultando assim no valor do LL do ensaio em porcentagem.

### 3.1.4 Limite de plasticidade

O limite de plasticidade (LP) ocorre com a perda de umidade no solo, com isso o solo fica plástico; com o aumento do percentual da perda de água, o mesmo se torna quebradiço (PINTO, 2006).

De acordo com a norma ABNT NBR 7180:2016, foi utilizado o menor teor de água para moldar um corpo de prova sobre uma placa de vidro na forma de um cilindro de 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento sem fraturar, conforme a Figura 5 e levado à estufa com temperatura de 105°C a 110°C, logo após determinado o limite de plasticidade.

**Figura 5:** Ensaio de limite de plasticidade



Fonte: arquivo dos autores, 2020.

O processo foi repetido de modo a obter pelo menos três valores de umidade. Portanto, o limite de plasticidade foi a média dos valores de umidade considerados satisfatórios (pelo menos três) sendo expresso em porcentagem.

### 3.1.5 Compactação Proctor

Em 1933, deu-se início a técnica de compactação através das observações feitas pelo engenheiro norte-americano Proctor. Segundo ele, aplicando-se certa energia de compactação (número de golpes de um soquete padronizado sobre o solo contido num molde), a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver. Ao se compactar com uma umidade baixa, o atrito é muito alto entre as partículas, assim não se consegue uma redução significativa dos vazios; também se compactar com maiores umidades, a água provoca efeito de lubrificação entre as partículas, deslizando-se entre si, tornando-se mais compacto (PINTO, 2006).

O ensaio seguiu conforme a norma ABNT NBR 7182:2016, sendo que a curva de compactação foi obtida através de cinco amostras do mesmo material. Foi aplicada a energia de Proctor Normal, utilizando um cilindro pequeno no qual se colocou o estéril em três camadas, sendo que para cada camada aplicaram-se 26 golpes. A Figura 6 mostra pesando o cilindro mais o material compactado.

**Figura 6:** Pesagem do material compactado



Fonte: arquivo dos autores, 2020.

Logo após os ensaios, foram utilizados os dados obtidos para a elaboração da curva de compactação, em que se pôde analisar a umidade ótima.

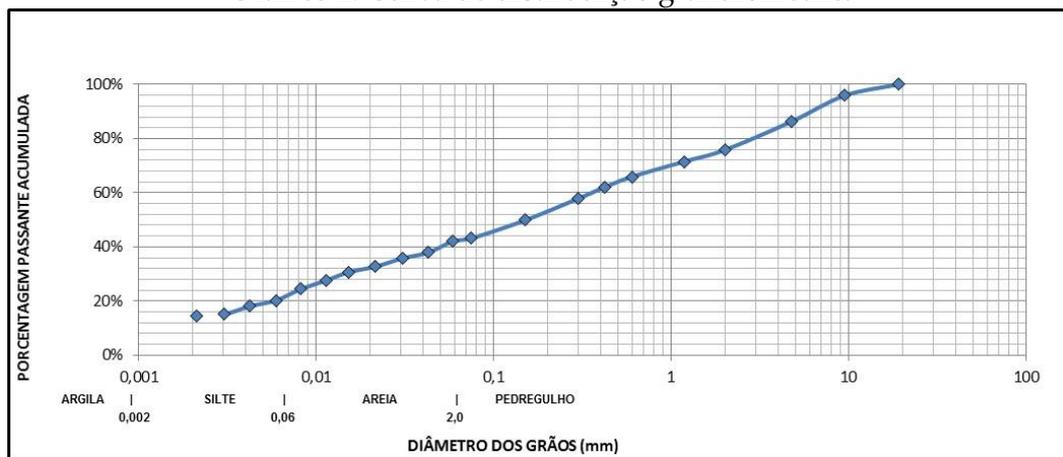
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item, são apresentados os resultados de acordo com as etapas da metodologia. Os dados coletados durante a execução dos ensaios laboratoriais encontram-se nos apêndices.

#### 4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO

Após os dados gerados no ensaio de sedimentação, realizaram-se os cálculos para obter os diâmetros das partículas e porcentagem de suspensão. Por meio dos resultados obtidos com o peneiramento grosso e com o peneiramento fino, traçou-se uma curva com a distribuição granulométrica dos valores das aberturas das peneiras e as porcentagens passantes acumuladas, Gráfico 1.

**Gráfico 1:** Curva de distribuição granulométrica



Fonte: dados da pesquisa, 2020.

Pode-se observar que, no estéril, o predominante é o silte (34,49%), que apresentou uma pequena porcentagem em relação à da areia (33,64%), posteriormente pedregulhos (24,18%) e, por último, 7,68 % de argila, segundo a norma ABNT NBR 6502:1995. Pela classificação rodoviária, o estéril equivale a um solo silteoso, de qualidade regular e fraco para utilização em subleitos de rodovias.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO ESTÉRIL

De acordo com o Anexo B da norma ABNT NBR 6458:2016, os dados obtidos através das duas amostras ensaiadas são de 2,87 e 2,91. A Tabela 2 representa a média de massa específica do estéril.

**Tabela 2:** Massa específica do estéril

Material	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Estéril	2,89

Fonte: dados da pesquisa, 2020.

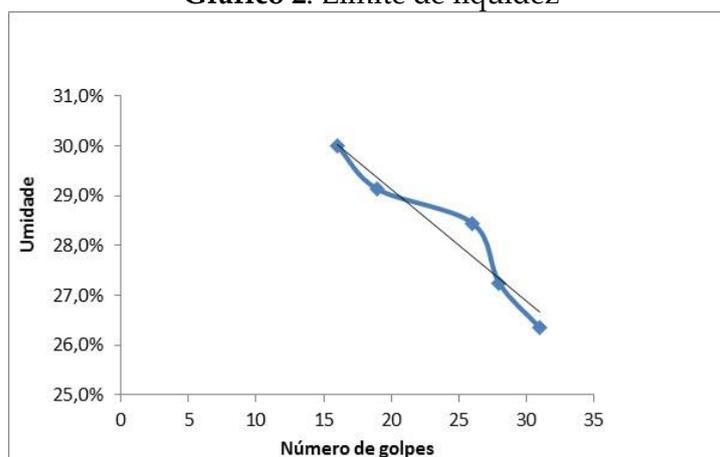
A densidade de um material está relacionada ao grau de concentração da massa do agregado em um determinado volume sem considerar os poros e espaços vazios formados entre eles.

Segundo Caixeta (2018), quando se obtêm os valores médios de massa específica maiores que  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , são característicos dos minerais de quartzo, caulinita, muscovita, feldspatos sódicos, cálcicos e potássicos, hornblenda e montmorilonita.

#### 4.3 LIMITE LIQUIDEZ

Depois de feito o ensaio, o Gráfico 2 mostra o número de golpes por teor de umidade, pôde-se analisar o resultado do ensaio de LL feito com a amostra de estéril.

**Gráfico 2:** Limite de liquidez



Fonte: dados da pesquisa, 2020.

Foi possível verificar que, para o valor de 25 golpes definidos pela norma, obteve-se, para o limite de liquidez, o valor de umidade igual a 28%. Pela tabela de AASHTO, é classificado com A4 (siltoso) e classificado pela SUCS como um material siltoso de baixa compressibilidade (ML).

#### 4.4 LIMITE DE PLASTICIDADE

Através do ensaio realizado, foi calculada a média dos três valores satisfatórios, resultando em uma média de 22,82%. O LP do estéril, para atender a norma, é o valor inteiro mais próximo 23%.

Por meio dos valores dos limites obtidos e segundo a norma ABNT NBR 7180:2016, foi possível obter o Índice de Plasticidade (IP) fazendo a diferença entre o LL e o LP, resultando em 5%, por conter menor percentual de argila o estéril pode-se ser classificado como solo fracamente plástico, pois o IP do estéril se encontra entre 1 a 7%.

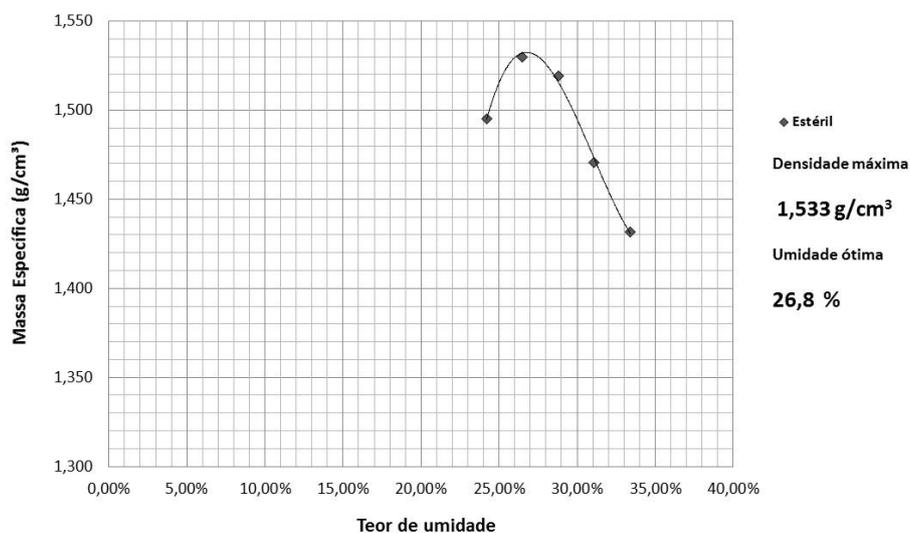
Foi possível também obter o índice de consistência (IC) através dos valores de LL, IP e h (umidade natural da amostra), em que h equivale a 8,8%. IC é a diferença de LL e h por IP, resultando no valor de 2,61.

#### 4.5 COMPACTAÇÃO

Com as massas específicas secas determinadas e os valores do teor de umidade de cada ensaio, foi possível traçar a curva de compactação. Foi possível correlacionar a umidade ótima para cada traço no eixo das abscissas e a massa específica seca no eixo das ordenadas.

A mistura, quando compactada, tende a ter a diminuição dos vazios e consequentemente a variação da umidade de água acaba diminuindo, umidade que interfere diretamente na densidade da mistura. No Gráfico 3, pode ser analisado ao topo a umidade ótima da compactação do estéril.

**Gráfico 3: Compactação Proctor**



Fonte: dados da pesquisa, 2020.

Segundo Caputo (1988), os parâmetros da compactação se deram de forma esperada, pois o estéril possui um valor de umidade ótima de 26,8% e a densidade máxima de 1,53 g/cm, enquadrando-se na média para materiais silteosos.

#### 5 CONCLUSÃO

Com o aumento na atividade de mineração para a extração de minérios, vêm aumentando também os impactos socioambientais; com isso, cada vez mais estudiosos têm analisado, por meio de estudos experimentais, a viabilidade para esses resíduos descartados no meio ambiente. O presente estudo possibilitou analisar e caracterizar o estéril oriundo de mineração de fosfato de uma mineradora localizada no Alto do Paranaíba (MG).

Através do ensaio de análise granulométrica, identificou-se que o estéril é composto por materiais silteosos. O material silteoso é considerado um intermediário entre a areia e a argila. Contém materiais finos e não tem uma boa coesão e plasticidade, tornando-o um solo instável, favorecendo a ocorrência de processos erosivos.

Na análise empreendida, a massa específica do estéril é semelhante aos solos comuns. Por meio dos dados obtidos no ensaio de compactação, foi possível identificar a umidade ótima de 26,8% e massa específica de 1,533 g/cm<sup>3</sup>.

Com os resultados obtidos através dos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), obteve-se o índice de plasticidade (IP), sendo possível classificar a amostra do estéril como material siltoso de baixa compressibilidade e fracamente plástico por apresentar IP = 5%. A consistência do solo pode ser classificada, segundo a NBR-6502, como dura, pois apresentou como resultado o valor de IC igual a 2,61.

O estéril, por se tratar de um solo, pode variar suas características físicas. Essas variações se dão em função das diferentes áreas geológicas da qual ele é extraído e podem diferenciar das de estudos correlacionados. Caixeta (2018) apresentou, em sua pesquisa, a viabilidade para obras de alteamento de jusante. De acordo com Graças (2018), o estéril é viável para camadas de base e sub-base em pavimentação viária. Lopes (2018) apresentou estudos com a substituição parcial do agregado graúdo por estéril na fabricação de concreto; já Sanches (2020) apresentou resultados satisfatórios para substituição parcial do agregado miúdo por estéril na fabricação de argamassa de assentamento.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Agregados - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:1995**: Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

BITTAR, Rafael Jabur. **Caracterização tecnológica de rejeitos de fosfato e análises de estabilidade da barragem de rejeitos B5 da Bunge Fertilizantes S/A**. 2006. 279 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2006.

CAIXETA, Ana Paula Camillo. **Estudos da viabilidade da utilização de estéreis de mina em obras de alteamento a jusante**. Estudo de caso: Barragem de rejeitos de Mirim. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas da Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CAVALCANTE, André Luís Brasil; SILVA, Ana Paula Moreira; VIANA, João Paulo. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**. Brasília: IPEA, 2012.

COSTA, Bruna Starling. **Simulação de alternativas locais de depósito de estéril para uma mina de fosfato**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Minas. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá, 2017.

GOMES, A. M. M. M.; COTA, G.; N., O. L. **Caracterização de lama de rejeito de beneficiamento de minério de ferro para construção de diques de concreto**. [s/d]. Disponível em: <https://even3.blob.core.windows.net/anais/83538.pdf>.

GRAÇAS, José Geraldo Marques das. **Análise da viabilidade de utilização de estéril de fosfato do complexo mineral de Patrocínio - MG em camadas de base e sub-base**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Centro Universitário do Cerrado Patrocínio. Patrocínio, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Resíduos de Mineração**. Brasília, 2016. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>.

LOPES, Diogo Faleiros. **Análise técnica da substituição parcial e total do agregado graúdo por estéril escalpado de mineração destinado a fabricação de concreto**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2018.

PETRONILHO, M. R. **Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análises de risco**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PROJETOSERRADOSALITRE. **Complexo Minerioindustrial de Serra do Salitre: um Projeto de Classe Mundial**. Disponível em: <https://www.projetoserradosalitre.com.br/o-projeto>.

SALIBA, F. P. M. **Avaliação hidrogeotécnica da fundação da pilha de estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas (Minas Gerais)**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SANCHES, Gisele Figueiredo. **Análise da substituição parcial do agregado miúdo por estéril na produção de argamassa de assentamento**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Centro Universitário de Patos de Minas. Patos de Minas, 2020.

SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S.; ARAÚJO, R. V. V. Produção de fosfato no Brasil: complexo de mineração de Tapira / Fosfertil. *In: XIX ENTMME*, 2002, Recife (PE).

SEERIG, Tamiris. **Estéreis em minas de minério de ferro: sua caracterização como material pozolânico após calcinação em forno flash**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SOUZA, Antônio Eleutério; FONSECA, David Siqueira. **Fosfato**. 2010. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-2-fosfato>.

SOUZA, Cristiano; RAFULL, Leidy; VIEIRA, Luciano. Determinação do Limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 460-464, 2000.

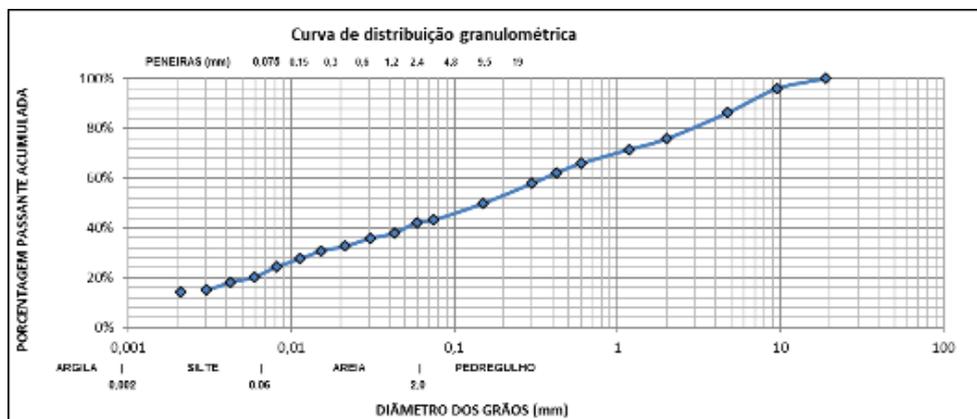
**APÊNDICE A – Análise granulometria por sedimentação – ABNT NBR 7181:201**

DENSÍMETRO	1
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOSFATO DE SÓDIO
DENSIDADE DOS GRÃOS	2,89
SEDIMENTO ÚMIDO (g)	120
UMIDADE	8,8%
SEDIMENTO SECO (g)	110,3
SOLO PASSADO NA #10 - 2 mm (%)	76%

TEMPO	Hora (h)	LEITURA (L)	TEMP. °C	LEITURA NO DISPERSOR (Ld)	DIÂMETRO DOS GRÃOS (mm)	% EM SUSPENSÃO
Início	07:58					
0,5 min	07:58:30	42	23,4	1,0019	0,059	42,1%
1 min	07:59:00	38	23,4	1,0019	0,043	38,0%
2 min	08:00:00	36	23,4	1,0019	0,031	35,9%
4 min	08:02:00	33	23,4	1,0019	0,021	32,7%
8 min	08:06:00	31	23,8	1,0018	0,015	30,7%
15 min	08:13:00	28	24,0	1,0018	0,011	27,6%
30 min	08:28:00	25	24,0	1,0018	0,008	24,4%
1h	08:58:00	21	24,1	1,0017	0,006	20,3%
2h	09:58:00	19	24,1	1,0017	0,004	18,2%
4h	11:58:00	16	24,6	1,0016	0,003	15,1%
8h	15:58:00	15	25,9	1,0014	0,002	14,3%
24h	07:58:00	9	24,3	1,0017	0,001	7,7%

CÁLCULOS	
Mt (total seca ao ar)	1000,0
Mg (retida acumulado #10)	226,7
Umidade higroscópica	8,80%
Ms (total seca)	937,45
Mh (material peneir. fino)	120

	MALHA	% pass.acum
Grosso (Qg)	19	100,00%
	9,5	95,93%
	4,75	86,30%
	2	75,82%
Fino (Qf)	1,18	71,53%
	0,6	65,94%
	0,425	62,17%
	0,3	57,91%
	0,15	49,86%
	0,075	43,23%



**APÊNDICE B – Limites de consistência do estéril**

<b>Limite de liquidez - NBR 6459:2016</b>					
Golpes	Teor de umidade				w% média
	C	C + Sw	C + Ss	w%	
31	8,85	13,9	12,87	25,6%	26,3%
	7,69	13,51	12,27	27,1%	
28	7,48	12,51	11,42	27,7%	27,2%
	6,45	11,18	10,18	26,8%	
22	8,56	14,76	13,39	28,4%	28,5%
	6,19	12	10,71	28,5%	
18	8,99	14,78	13,47	29,2%	29,1%
	8,3	13,59	12,4	29,0%	
16	6,68	12,42	11,09	30,2%	30,0%
	9,07	16,55	14,83	29,9%	

<b>LIMITE DE PLASTICIDADE</b>			
C	C+Sw	C+SS	Umidade
6,64	8,25	7,92	25,78%
7,4	8,61	8,35	27,37%
5,5	7,96	7,66	13,89%
5,52	7,98	7,5	24,24%
		MÉDIA	22,82%

### ANEXO A – Classificação Geral SUCS

TABELA II – CLASSIFICAÇÃO GERAL SUCS

Classificação geral	Tipos principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (menos que 50 % passando na # 200)	Pedregulho ou solo pedregulhoso ( <i>Gravel</i> )	GW, GP, GC e GM
	Areia ( <i>Sand</i> ) ou solo arenoso	SW, SP, SC E SM
SOLOS FINOS (mais que 50 % passando na # 200)	Silte(M) ou argila(C)	Baixa compressibilidade (LL < 50 ) ML, CL e OL
		Alta compressibilidade (LL > 50) MH, CH, OH
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfa ( <i>Peat</i> )	Pt

### ANEXO B – Classificações de Solos (AASHTO)

**CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS: Sugestão do Highway Research Board-HRB adotada pela AASHTO**

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)	6 máx.		NP	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

**Processo de classificação:** Com os dados de laboratório, iniciar a classificação da esquerda para a direita, por eliminação. O primeiro grupo da esquerda que satisfizer os dados será o grupo procurado.

**SOLOS A-7:** Se  $IP \leq LL - 30$ , será A-7-5; Se  $IP > LL - 30$ , será A-7-6.

**Índice de Grupo (IG):**  $IG = 0,2 \cdot a + 0,005 \cdot a \cdot c + 0,01 \cdot b \cdot d$

Onde:

p: teor de silte + argila do solo, ou seja, a porcentagem que passa na peneira nº 200.

$a = p - 35$  (se  $p > 75\%$ , adota-se 75 e se  $p < 35\%$ , adota-se 35)  $a$  varia de 0 a 40 e 0,2 .  $a$  varia de 0 a 8.  
 $b = p - 15$  (se  $p > 55\%$ , adota-se 55 e se  $p < 15\%$ , adota-se 15)  $b$  varia de 0 a 40 e 0,01 .  $b \cdot d$  varia de 0 a 8.  
 $c = LL - 40$  (se  $LL > 60\%$ , adota-se 60 e se  $LL < 40\%$ , adota-se 40)  $c$  varia de 0 a 20 e 0,005 .  $a \cdot c$  varia de 0 a 4.  
 $d = IP - 10$  (se  $IP > 30$ , adota-se 30 e se  $IP < 10$ , adota-se 10)  $d$  varia de 0 a 20 e 0,01 .  $b \cdot d$  varia de 0 a 8.

$IG_{\min.} = 0$   $IG_{\max.} = 20$

IG - o resultado final obtido deve ser um nº inteiro - aproximação para o nº inteiro acima.