

Considerações Técnicas Referentes ao Ensaio de Granulometria Voltado para o Dimensionamento de Sistema Interno de Drenagem de Barragens

Fernando Carolino da Silva

Engenheiro Geotécnico e Mestre em Geotecnia, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, fernandocarolinodasilva@hotmail.com

Arthur Cândido Dias

Engenheiro Geotécnico, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, arthur.dias@walmengenharia.com.br

Danilo Vítor dos Santos Mutzenberg

Engenheiro Geotécnico e Mestre em Geotecnia, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, danilo.mutzenberg@walmengenharia.com.br

Higor Silva Ferreira

Engenheiro Geotécnico, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, higor.ferreira@walmengenharia.com.br

Mariana Moura

Engenheira Geotécnica, WALM BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, nanarib@gmail.com

RESUMO: O dimensionamento do sistema de drenagem interna de barragens, sejam filtro verticais ou tapetes drenantes, é um processo complexo que envolve vários fatores, sendo necessário o conhecimento da configuração deste sistema e dos materiais a serem utilizados. As metodologias existentes para o dimensionamento de tal sistema dependem de dois parâmetros obtidos da curva granulométrica do material, D_{15} e D_{85} . No entanto, a metodologia para a determinação da curva granulométrica do solo estipulada pela norma tem se mostrado inadequada para a obtenção dos parâmetros da parcela mais fina, pois somente a ação do defloculante não é capaz de desagregar o material, necessitando de uma ação física para se obter uma curva completa. Este artigo apresenta a determinação completa da curva granulométrica de um solo intemperizado, utilizando a metodologia proposta na normativa e complementando-a com uma metodologia de ultrassom, obtendo-se assim um parâmetro D_{15} mais adequado. Os resultados mostram que para a obtenção de uma curva granulométrica completa de materiais intemperizados, geralmente é necessária uma ação física, como uso de ultrassom.

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem Interna, Curva Granulométrica, Ultrassom.

ABSTRACT: The design of the internal drainage system of dams, whether vertical filters or drainage mats, is a complex process that involves several factors, requiring knowledge of the configuration of this system and the materials to be used. The existing methodologies for sizing such a system depend on two parameters found in the particle size curve of the material, D_{15} and D_{85} . However, the methodology for determining the soil particle size curve stipulated by the standard has been excluded for obtaining the thinnest portion clauses, as only the action of the defloculant is not capable of disaggregating the material, requiring a physical action to stop it. get a full curve. This article presents the complete determination of the granulometric curve of a weathered soil, using the methodology proposed in the regulations and complementing it with an ultrasound methodology, thus seeking a more appropriate D_{15} parameter. The results show that to obtain a complete particle size curve of weathered materials, a physical action is generally necessary, such as the use of ultrasound.

KEYWORDS: Internal Drainage, Granulometric Curve, Ultrasound.

1 INTRODUÇÃO

As atividades de mineração resultam da extração, beneficiamento e transformação de minérios para diversos fins. Um dos produtos resultantes da mineração e do beneficiamento dos diversos tipos de minérios são os rejeitos, os quais são dispostos em estruturas de contenção e armazenamento, tais como: barragens e lagoas, as quais são, muitas vezes, parte integrante das usinas de mineração (Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, 1984). Portanto, o procedimento mais comumente utilizado pelas mineradoras para destinação de materiais gerados durante os processos de exploração mineral (rejeitos) é a construção de barragens de rejeito.

Quando as barragens de rejeito não são projetadas e construídas corretamente, elas podem romper, causando desastres ambientais e socioeconômicos. De acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM), em seu último *report* mensal (outubro de 2023), no Brasil há 929 barragens de mineração cadastradas no SIGBM, das quais 458 estavam enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB. Fernandes (2020), apresenta o total de falhas em barragens de rejeito baseado no boletim 121 do ICOLD (2001), e correlaciona os principais problemas aos seguintes fatores: instabilidade de taludes (24%), falhas – terremotos e galgamento (17 e 15%), fundações e infiltração ou problemas com drenagem (11%).

Cruz (2004), argumenta que o dimensionamento correto do sistema de drenagem interna de uma estrutura de barramento e suas correspondentes transições estão diretamente relacionados com a estabilidade da estrutura, controlando o fluxo de água através dos componentes de aterro e fundação da barragem. Segundo Silva (2016), a falha no fluxo dentro do corpo da barragem pode levar à saturação do maciço, fazendo com que a estrutura apresente elevados valores de poropressão reduzindo, assim, a resistência ao cisalhamento do material do aterro e levando à uma ruptura abrupta.

Nesse contexto, onde a condução dos fluxos deve ser feita de forma ordenada no interior do maciço da barragem, o sistema de drenagem interna assume papel fundamental para evitar a saturação do maciço, o que pode ocasionar a ruptura pelo modo de falha de erosão interna regressiva – *piping*. Para garantir o bom funcionamento do sistema de drenagem interna, as camadas de transição entre os materiais devem ser dimensionadas visando atender aos critérios de retenção, permeabilidade e uniformidade, permitindo, assim, que o fluxo em direção ao dreno ocorra sem o carreamento de material fino proveniente do aterro (TERZAGHI e PECK, 1962 e CRUZ, 2004). Ainda, esses critérios se baseiam na distribuição granulométrica dos materiais utilizados no projeto, e visam correlacionar o diâmetro das partículas do filtro com o diâmetro das partículas do solo-base (aterro da barragem) a partir dos parâmetros D_{15} e D_{85} , obtidos das curvas granulométricas dos materiais.

A NBR 7181, de 2016, busca nortear os ensaios para definição da granulometria de um material, mas o que se tem observado, na prática, é que tal metodologia não é adequada para obtenção dos parâmetros da parcela mais fina do solo, principalmente quando se trata de material de aterro de barragem. Isso porque somente a ação do defloculante não é capaz de desagregar o material, necessitando de uma ação física para se obter uma curva granulométrica completa, principalmente para a obtenção do parâmetro D_{15} .

A desagregação utilizando apenas o defloculante não é totalmente eficaz quando aplicada aos solos tropicais, os quais predominam no território brasileiro. Segundo Roseno e Camapum de Carvalho (2007), as propriedades desses solos geralmente são avaliadas através de metodologias que foram desenvolvidas para solos em climas temperados. Os autores analisaram a estabilidade dos agregados presentes em um perfil de solo tropical por meio do uso de defloculante químico e de ultrassom. As análises granulométricas foram feitas utilizando-se um granulômetro a laser, e os resultados obtidos mostraram a existência de agregações que se desfazem tanto pela ação química do defloculante quanto pela ação física do ultrassom.

Logo, o objetivo do presente artigo é apresentar a determinação completa da curva granulométrica de um solo intemperizado, utilizando a metodologia proposta na normativa e complementando-a com a utilização do ultrassom, obtendo-se, assim, um parâmetro D_{15} mais adequado.

As amostras utilizadas nos ensaios desses estudos foram coletadas no Campo Experimental do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, localizado no Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, em Brasília – DF. O referido material foi considerado como sendo constituinte do maciço de uma barragem para disposição de rejeitos de mineração, onde a granulometria foi determinada através de metodologia convencional proposta pela normativa da ABNT e as metodologias complementares foram utilizadas para determinação da curva granulométrica completa da amostra. Como pode-se observar, os materiais estudados tratam-se de solos localizados em regiões tropicais, que não podem ser avaliados a partir da mecânica dos solos clássica.

2 BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dimensionamento de Drenagem Interna de Barragens

2.1.1 TERZAGHI e PECK, 1962

Os critérios de retenção baseados nas curvas granulométricas visam relacionar o diâmetro das partículas do filtro com diâmetro das partículas do solo subjacente, baseado na distribuição de partículas de ambos os materiais (ARAUJO, 2019). Devido à percolação de água em solos bem graduados, é necessário que o filtro seja bem dimensionado, de modo a bloquear as partículas com seus vazios, retendo as partículas mais finas.

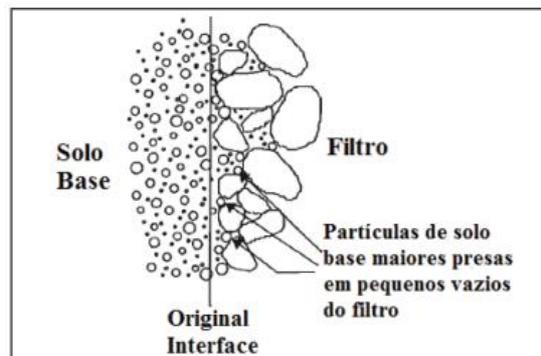


Figura 1. Interface solo – filtro (adaptado de LOCKE, 2001, apud FIDELES E MALVEIRA, 2017).

O critério abordado por Terzaghi e Peck (1962), adotado para projetos de filtros granulares, baseia-se no uso de areias uniformes, e possui duas premissas, sendo a primeira referente ao critério de filtragem ou contenção do material, em que $D_{15\text{Filtro}}/D_{85\text{Solo-Base}} \leq 4$ ou 5; e a segunda referente ao critério de permeabilidade, em que $D_{15\text{Filtro}}/D_{85\text{Solo-Base}} \geq 4$ ou 5.

2.1.2 CRUZ, 2004

Segundo CRUZ (2004), em qualquer interface de dois materiais granulares onde há fluxo da água do material mais fino para o mais grosseiro, pode ocorrer o carreamento de algumas partículas finas, gerando o fenômeno de *piping* em barragens. Neste contexto, o autor propõe uma metodologia para o dimensionamento do sistema de drenagem interna e suas transições, baseada em parâmetros obtidos por meio da curva granulométrica dos materiais a serem utilizados no aterro do barramento e no sistema de drenagem interna.

No dimensionamento de transições internas deverá ser considerado, como material de transição, qualquer material cuja função estrutural seja a de evitar o carreamento de grãos do material vizinho, que está sendo retido através de contenção esterométrica. Ainda, sempre que as transições façam parte dos sistemas de drenagem, superpõe-se ao requisito de contenção do material vizinho o requisito de permeabilidade (CRUZ, 2004). O autor apresenta critérios de dimensionamento de drenos baseados nos tipos de material que poderão estar em contato numa barragem, sendo eles: maciço/dreno, transição/seção drenante, entre outros. A seguir, se encontram descritos os critérios a serem adotados para cada material:

Transições para o sistema de drenagem interna:

D_n = diâmetro n do grão do dreno ou transição;

d_n = diâmetro n do material de base;

n = porcentagem em peso de partículas menores do que o diâmetro respectivo (D ou d).

Interface material coesivo – material granular:

$D_{15}/d_{85} \leq 5$ e $D_{15} \leq 1,00$ mm – Critério de Contenção;

$D_{15}/d_{85} \geq 5$ e $D_{15} > 0,074$ mm – Critério de Permeabilidade.

O autor cita que os valores de d_{15} e d_{85} do material base (coesivo) devem ser obtidos por ensaio de sedimentação sem o uso de defloculante e sem agitação mecânica. Entretanto, na grande maioria das vezes, devido ao processo de intemperização do material de base utilizado, são formadas agregações em tais materiais e o uso do defloculante não proporciona uma curva granulométrica completa do material. Ainda, segundo o autor, esses critérios não devem ser aplicados em materiais dispersivos. Para tais materiais, recomenda-se a realização de ensaios de laboratório para atender a requisitos de “filtro efetivo”.

Interface material granular fino – material granular:

$D_{15}/d_{85} \leq 5$ – Critério de Contenção;

$D_{15}/d_{15} \leq 5 \leq 5$ e $D_5 > 0,074$ mm – Critério de Permeabilidade.

Interface material granular – material granular:

$D_{15}/d_{85} \leq 9$ – Critério de Contenção;

$D_{15}/d_{15} \geq 5$ – Critério de Permeabilidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Solo Estudado

Silva (2022) e diversos outros autores listados em seu trabalho, estudaram o perfil de solo do Campus Experimental da Universidade de Brasília, na cidade de Brasília, mais especificamente na Asa Norte, Distrito Federal. Amostras indeformadas e deformadas foram coletadas para caracterização geotécnica dos materiais, variando nas profundidades de 2,00 m, 4,00 m, 5,00 m, 6,00 m, 8,00 m, 9,00 m, 10,00 m e 12,00 m. O perfil de intemperismo do Campus Experimental, segundo Guimarães (2002), pode ser dividido em três horizontes, a saber: i) solo residual laterítico (0,00 m a 8,80 m), sendo constituído por uma argila arenosa vermelha escura entre 0,00 m a 5,00m, e uma argila pedregulho arenosa vermelha escura entre 5,00 m a 8,80 m; ii) horizonte de transição (8,80 m a 10,30 m), sendo constituído por um predomínio de solo laterítico entre 8,80 m a 9,80 m, com poucas estruturas reliquias entre 9,80 m a 10,30 m; iii) horizonte de solo saprolítico de metarritimito (10,30 a 15,00m), sendo constituído por uma intercalação de quartzo entre 10,30 m a 11,30m, e um silte argiloso vermelho entre 11,30 m a 15,00 m. Em relação à determinação granulométrica dos materiais do campus experimental da UnB, contemplou-se granulometrias com e sem o uso de defloculante. Entretanto, Roseno e Camapum de Carvalho (2007) apresentaram curvas granulométricas determinadas, usando a metodologia do granulômetro a laser (FIGURA 2). Ambos os autores analisaram a estabilidade dos agregados presentes no perfil de solo de Brasília por meio do uso de defloculante químico e de ultrassom, e mostraram que, no perfil de solo analisado, existem agregações que se desfazem pela ação química do defloculante e outras pela ação física do ultrassom.

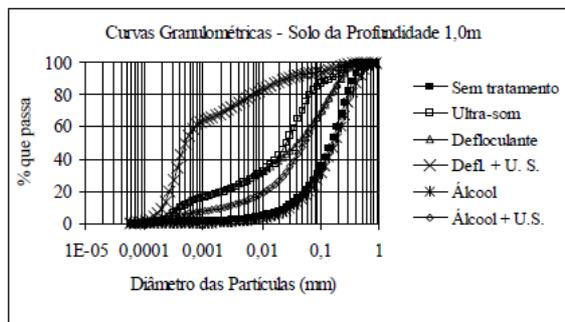


Figura 2. Influência das Condições de Ensaio sobre a Granulometria do Solo Muito Intemperizado, pré-seco (ROSENO E CAMAPUM DE CARVALHO, 2007).

O comportamento hidromecânico dos solos, seja no estado saturado, seja no estado não saturado, está diretamente associado à composição químico-mineralógica e às características estruturais que apresentam (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015).

Segundo Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021), o teor de gibbsita, que é mais próximo à superfície do solo, permanece constante entre 2,00 m e 4,00 m de profundidade, diminuindo com a profundidade. O comportamento oposto é observado para a caulinita. A caulinita, neste caso, é provavelmente originada do intemperismo da muscovita.

Os autores discorreram também sobre a grande similaridade entre o teor de quartzo e gibbsita ao longo de todo o perfil. Na condição neoformada, o quartzo está presente em quantidades significativas no interior das agregações, como observado nas lateritas do Distrito Federal. Os minerais presentes no solo nessas condições não influenciam no comportamento hidromecânico do solo, o que relativiza a importância da composição mineralógica no estudo do comportamento de solos tropicais não saturados e na definição da própria curva característica solo-água.

De acordo com Camapum de Carvalho *et al.* (2015), nos minerais mais granulares e menos ativos, como o quartzo, a retenção de água assume natureza predominantemente física, dando origem ao denominado efeito capilar. Já nos minerais menores e mais ativos, como os argilominerais, de um modo geral, a retenção de água assume natureza predominantemente química, com energia de adsorção significativa, o que dá origem à sucção propriamente dita.

As microestruturas típicas de perfis de solos submetidos ao processo de intemperismo tropical são apresentadas a seguir, em que tal exemplo refere-se ao Campus Experimental da Universidade de Brasília. O estudo é apresentado em Camapum de Carvalho e Gitirana Jr. (2021). Na Figura 3 (a, b) são ilustradas as microestruturas de um solo profundamente intemperizado. Segundo os autores, o que se pode observar na Figura 3 (a), no solo coletado mais superficialmente (a 2,00 m de profundidade), é que existe a predominância de agregados com macroporos entre eles, e esses agregados possuem microporos como apresentado na Figura 3 (b). A 5,00 m de profundidade (Figura 3 (b)), é possível observar que os agregados ainda estão presentes, mas em menor quantidade.

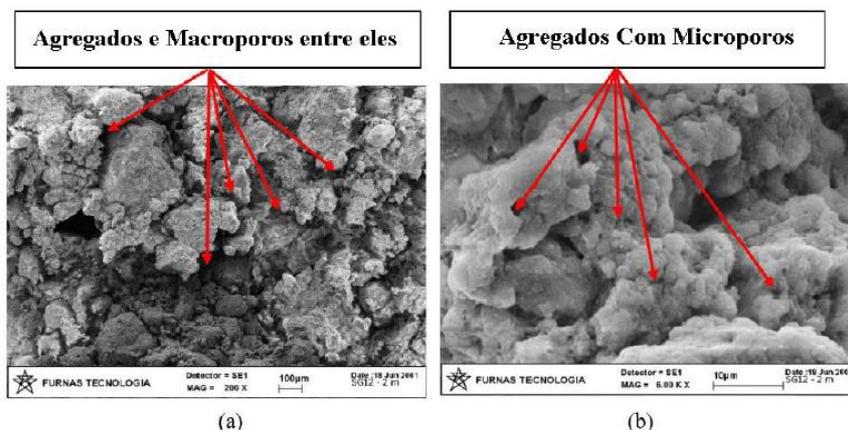


Figura 3. Microestrutura dos Solos ao Longo do Perfil de Intemperismo: solos profundamente intemperizados (a, b) (CAMAPUM DE CARVALHO E GITIRANA JR., 2021).

Esta análise microestrutural, combinada com a análise mineralógica exemplificada na seção anterior, mostra que, em perfis de intemperismo em regiões tropicais, transformações mineralógicas e estruturais andam de mãos dadas.

3.2 Metodologias para Determinação de Granulometria

A normativa brasileira ABNT NBR 7181, de 2016, apresenta a metodologia para determinação de uma análise granulométrica de solo através do peneiramento e sedimentação. A título de conhecimento, após a preparação da amostra conforme ABNT NBR 6457:2024, e operações preliminares determinando-se a massa da amostra seca em temperatura ambiente, passa-se o material na peneira 2,0 mm, separa-se a porcentagem retida para o peneiramento grosso (peneira de 50 mm a 4,8 mm) e utiliza-se a porcentagem passante para determinação da distribuição granulométrica apenas por peneiramento, na qual são utilizados 100 g para três

determinação de umidade higroscópica, e 120 g para pesagem e lavagem na peneira 0,075 mm. Posteriormente, determina-se a granulometria passando o material seco da peneira 1,2 mm a 0,075 mm. Já no processo de sedimentação e peneiramento, utiliza-se a porcentagem passante na peneira 2,0 mm tomando 100 g para determinação da umidade hidrosférica e 120g (para solos arenosos) ou 70 g (solo siltsos e argilosos) para sedimentação e peneiramento fino, conforme os passos a seguir: junta-se ao material, como defloculante, 125 cm³ de hexametáfosfato de sódio com a concentração de 45,7 g do sal por 1000 g de solução. Em seguida, após a solução atingir o pH entre 8 e 9, deve-se agitar até que todo material fique imerso e manter em repouso por, no mínimo, 12 h. Na sequência, submete-se a mistura no aparelho dispersor por 15 minutos e, após a estabilização da temperatura, iniciam-se as leituras do densímetro correspondente aos tempos de sedimentação (t) de 0,5 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1h, 2h, 4h, 8h e 24h, a contar do início da sedimentação. Por fim, deve-se seguir com a secagem do material e determinação da granulometria, passando o material da peneira 1,2 mm a 0,075 mm.

Já os autores Roseno e Camapum (2007) propõem a utilização de granulômetro a laser para determinação granulométrica do solo, pois com essa metodologia é possível fisicamente desagregar partículas inferiores a fração de argila com o bombardeamento de uma dispersão do solo em água através de feixe de raios laser. Os autores utilizam solos retirados em profundidade de 1,00 m, 4,00 m e 8,00 m do Campus Experimental de Brasília, passantes na peneira nº 40, devido as características do granulômetro utilizado. Dessa forma, foram executados ensaios nas condição padrão do ensaio e em meios dispersantes quimicamente diferentes, considerando o grau de intemperização do solo, como: dispersos em água destilada e sem o uso de ultrassom; dispersos em água destilada e com o uso de ultrassom; dispersos em solução de hexametáfosfato de sódio e sem o uso de ultrassom; dispersos em solução de hexametáfosfato de sódio e com o uso de ultrassom; dispersos em álcool e sem o uso de ultrassom; dispersos em álcool e com o uso de ultrassom. Os autores concluíram que, devido ao fato de os materiais possuírem elevados graus de intemperização, o tipo de método utilizado para determinar a curva granulométrica influenciava significativamente nos resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Granulometria do Material em Estudo

Tendo em vista as agregações presentes no material em estudo, determinou-se a granulometria do solo utilizando-se a metodologia da normativa brasileira e a complementação da curva por meio do uso da metodologia com granulômetro a laser, com o uso de defloculante e ultrassom, desagregando ao máximo o material avaliado (Figura 4).

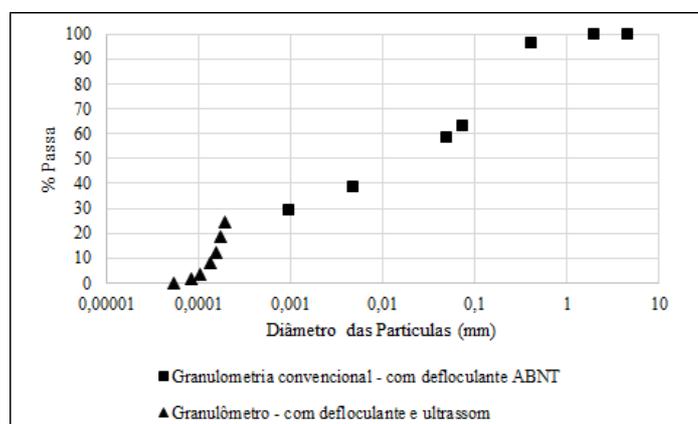
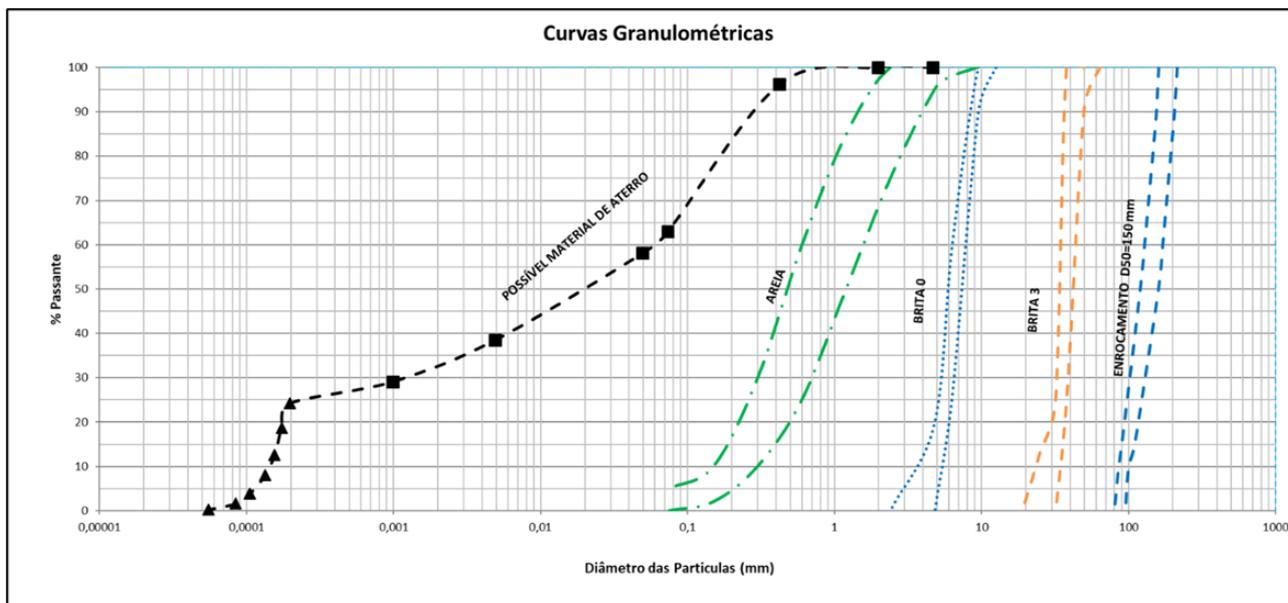


Figura 4. Curva granulométrica da amostra de 2,00 m do Campus Experimental da UnB (SILVA, 2022).

4.2 Aplicação em Barragens de Mineração

Conforme já explanado ao longo do presente artigo, tal estudo averigua a importância das determinações das curvas granulométricas utilizadas no aterro de barragens de mineração e dos materiais que irão compor o sistema de drenagem interna do barramento e suas respectivas transições, de forma a evitar a colmatção do dreno, o que pode ocasionar o fenômeno *piping*.

Assim, a Figura 5 apresenta as faixas granulométricas dos seguintes materiais: areia, brita 0, brita 3 e enrocamento, e do material a ser utilizado no aterro hipotético de uma barragem de mineração, caso esse apresente características como do solo tropical de Brasília.



- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: *Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 2016. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: *Solos – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro, 2024. 7p.
- ARAÚJO, Antonio A. F. *Estudo teórico e experimental da segurança de filtros de barragens de terra à erosão interna*. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 23-35. 2019.
- Camapum de Carvalho, J.; Gitirana Junior, G.F.N.; Machado, S.L.; Mascarenha, M.M.A.; Filho, F.C.S. (2015). *Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico*. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS). 805p.
- Camapum de Carvalho, J. and Gitirana Jr.(2021). *Unsaturated soils in the context of tropical soils*. In *Soils and Rocks*. Vol 44 (3), pp. 1-25.
- CRUZ, Paulo T. *100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto*. 2. ed.
- Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. 1984. *Código de Mineração e legislação correlata*. República Federativa do Brasil. Ministério das Minas e Energia. Brasília, DF, 292p.
- Fernandes, Rafaela Baldi. *Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA*. Tese de Doutorado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, 2020.
- FIDELES, B.; MALVEIRA, V. *Segurança nas barragens Gangorra e Itaúna contra erosão interna*. Revista Tecnologia, v. 38, n. 2, p. 1–19, 2017.
- Guimarães, R.C (2002). *Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas*. Dissertação de mestrado. Publicação nº G. DM – 090A/02, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183p.
- Roseno, J. L.; Camapum de Carvalho, J.. *Avaliação Granulométrica De Um Perfil De Solo Tropical Usando O Granulômetro A Laser*. In: III Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, 2007, Cuiabá. III Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Cuiabá: KCM Editora & Distribuidora, 2007. v. 1. p. 1-11.
- SILVA, Dayana S. *Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens*. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2016.
- SILVA, F. C. (2022). *Estimativa de Curvas Características de Solos Tropicais Brasileiros Via Métodos Indiretos*. Dissertação de Mestrado, Publicação - 372/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 236p.
- TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B. *Mecânica dos solos na prática da engenharia*. 1. ed. Rio de Janeiro: Tradução A. J. da Costa Nunes e M. de L. C. Campello., 1962.