



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Ingrid Nunes Viana

**DIMENSIONAMENTO DE TRANSIÇÕES GEOTÉCNICAS DE
FILTROS DE BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA, POR
DOIS CRITÉRIOS: TERZAGHI E FELL (2005)
ESTUDO DE CASO**

Ouro Preto

2023

Dimensionamento de Transições Geotécnicas de Filtros de Barragem de Terra
Homogênea, por Dois Critérios: Terzaghi e Fell (2005)

Estudo de Caso

Ingrid Nunes Viana

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 30/03/2023

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: M.Sc. Hebert da Consolação Alves – UFOP

Ouro Preto - MG

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

V614d Viana, Ingrid Nunes.

Dimensionamento de transições geotécnicas de filtros de barragem de terra homogênea, por dois critérios: Terzaghi e Fell (2005)

[manuscrito]: estudo de caso. / Ingrid Nunes Viana. - 2023.

63 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Me. Hebert da Consolação Alves.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Geotécnica. 2. Barragens de terra. 3. Drenagem - Drenagem interna. 4. Filtros e filtração - Filtros Verticais e Inclinação. I. Alves, Hebert da Consolação. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ingrid Nunes Viana

**Dimensionamento de transições geotécnicas de filtros de barragens de terra homogênea, por dois critérios: Terzaghi e Fell(2005)
Estudo de Caso**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovada em 30 de março de 2023

Membros da banca

Engº M.Sc - Hebert da Consolação Alves - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Engº M.Sc - Bruno Felipe Canatto - Universidade Federal de Ouro Preto
Engº M.Sc - João Paulo Aparecido Arruda - CMOF Fosfatos S/A

Hebert da Consolação Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Hebert da Consolacao Alves, TECNICO DE LABORATORIO AREA**, em 27/04/2023, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0516218** e o código CRC **E90F0A0E**.

“A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que permitiu que mais essa etapa da minha vida fosse concluída.

Aos meus pais, Édio e Enilda por todo apoio e incentivo, sem vocês esse sonho nunca teria sido realizado.

Ao Laboratório de Ferrovias e Asfalto por todo aprendizado, e em especial ao meu orientador Eng^o MSc. Hebert da Consolação Alves, pela contribuição e aprendizado compartilhado para o desenvolvimento desse trabalho.

À STATUM Geotecnia pela oportunidade de realizar meu estágio e principalmente, ao engenheiro Roger Santos pela inspiração do tema, tempo disponibilizado e conhecimentos transmitidos.

Ao Amarildo pela paciência e companheirismo durante todo esse período.

Aos meus amigos de longa data e aos que conquistei durante minha graduação, em especial aos que se tornaram minha segunda família, nos quais são todos os moradores, ex-alunos, agregados da República Tchu Tchu Tchu.

Por fim, agradeço à Escola de Minas e Universidade Federal de Ouro Preto, pelo ensino público e de qualidade.

RESUMO

No Brasil a barragem de terra é muito utilizada em razão das características topográficas devido a existência de inúmeras regiões de vales e a grande quantidade de material terroso disponível. Nesse tipo de estrutura, em função das condições de permeabilidade do aterro e o regime de percolação estabelecido, a linha freática resultante em fluxo permanente, atinge o talude (paramento de jusante) e com isso, é preciso que haja uma drenagem eficiente com materiais permeáveis para o controle destes fluxos. Os elementos drenantes, são formados por filtros horizontais, verticais ou inclinados, drenos de pé, dentre outros. Uma vez que um dos problemas mais recorrentes nesse tipo de estrutura geotécnica é a ocorrência de fluxo não controlado pelo maciço, com possibilidade de formação de forças de percolação elevadas que levem ao efeito de erosão interna no próprio corpo da barragem ou nas suas fundações (sendo o *piping* o de maior ocorrência) (MASSAD, 2003). Destaca-se que os elementos filtrantes de um barramento, podem ser formados por materiais de granulometrias diversas, onde, a sua aplicabilidade deverá ser sempre avaliada a partir de critérios específicos, uma vez que, devido as características granulométricas dos aterros (solos de características finas), divergem-se dos elementos filtrantes, como areia a britas. A utilização de materiais não adequados pode gerar processos de colmatção (perda da capacidade drenante) dos filtros, levando a possíveis processos de instabilidade física e/ou de erosão interna (CAVALHEIRO, 2018). Diante desse contexto, o presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo realizar a comparação do dimensionamento de filtros naturais (transições geotécnicas) para barramentos em geral, a partir do critério de Terzaghi (TERZAGHI e PECK, 1962) e do critério de Fell (FELL, MACGREGOR, et al., 2005) que é uma adaptação dos critérios elaborados por Sherard e Dunnigan (1985, 1989), USBR (1987) e USDA-SCS (1994) em dois estudos de casos: uma amostra denominada neste trabalho como Amostra 1 proveniente de um aterro de uma barragem de terra localizada na cidade de Ipeúna-SP, e outro material nomeado pelo autor como Amostra 2 que foi obtida de áreas de empréstimo adequadas para serem utilizadas em barragem de terra homogênea localizadas nas cidades de Ijuí e Augusto Pestana no Rio Grande do Sul. No desenvolvimento do estudo foram realizados cálculos com base nos dois métodos no qual foi possível obter os pontos de limite das faixas granulométricas dos elementos de transição geotécnica e por conseguinte plotá-los em gráficos para uma melhor visualização. Com isso, para a Amostra 1 foi possível realizar o dimensionamento dos materiais das camadas geotécnicas por ambos os métodos, entretanto a Amostra 2 só foi dimensionada a partir do método de Fell, uma vez que não foi possível obter o equivalente a 15% da partícula mais fina (D_{15}) da amostra.

Palavras-chaves: geotecnia, barragem de terra, drenagem interna, filtro.

ABSTRACT

In Brazil, the earth dam is widely used due to the topographic characteristics due to the existence of numerous valley regions and the large amount of earth material available. In this type of structure, depending on the permeability conditions of the landfill and the established percolation regime, the water table resulting in permanent flow, reaches the slope (downstream face) and with that, there must be efficient drainage with permeable materials to control these flows. The draining elements are formed by horizontal, vertical or inclined filters, foot drains, among others. Since one of the most recurrent problems in this type of geotechnical structure is the occurrence of uncontrolled flow through the massif, with the possibility of formation of high percolation forces that lead to the effect of internal erosion in the dam body itself or in its foundations (being piping is the most frequent) (MASSAD, 2003). It is noteworthy that the filtering elements of a dam can be made up of materials of different granulometry, where their applicability should always be evaluated based on specific criteria, since, due to the granulometric characteristics of landfills (soils with fine characteristics), differ from filtering elements, such as sand and gravel. The use of unsuitable materials can generate clogging processes (loss of draining capacity) of the filters, leading to possible processes of physical instability and/or internal erosion (CAVALHEIRO, 2018). Given this context, this Course Completion Work aims to compare the design of natural filters (geotechnical transitions) for dams in general, based on Terzaghi's criterion (TERZAGHI and PECK, 1962) and Fell's criterion (FELL, MACGREGOR, et al., 2005) which is an adaptation of the criteria elaborated by Sherard and Dunnigan (1985, 1989), USBR (1987) and USDA-SCS (1994) in two case studies: a sample denominated in this work as Sample 1 from an earth dam embankment located in the city of Ipeúna-SP, and another material named by the author as Sample 2 which was obtained from loan areas suitable for use in a homogeneous earth dam located in the cities of Ijuí and Augusto Pestana in Rio Grande do Sul. In the development of the study, calculations were performed based on the two methods in which it was possible to obtain the limit points of the granulometric ranges of the geotechnical transition elements and therefore plot them in graphs for a better visualization. Thus, for Sample 1 it was possible to dimension the materials of the geotechnical layers by both methods, however Sample 2 was only dimensioned using the Fell method, since it was not possible to obtain the equivalent of 15% of the particle thinnest (D₁₅) of the sample.

Keywords: geotechnics, earth dam, internal drain, filter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das barragens pelo país.....	2
Figura 2 - Levantamento das barragens cadastradas no Brasil.....	6
Figura 3 - Levantamento de acidentes e incidentes.....	12
Figura 4 - Princípios básicos de segurança de barragens.	14
Figura 5 - Histórico filtro de barragem: a) barragem sem filtro b) barragem com filtro horizontal e vertical.....	16
Figura 6 - Exemplo de um detalhamento das transições geotécnicas de um dreno vertical.....	16
Figura 7 - Interface bem graduada.....	17
Figura 8 – Localização do Ponto 2.....	24
Figura 9 - Localização do Solo A, Solo B, Solo C e Solo D.	25
Figura 10 - Curva de distribuição granulométrica do Ponto 2 e Amostra 1.....	26
Figura 11 - Curva de distribuição granulométrica do Solo A, Solo B, Solo C, Solo D e Amostra2.	28
Figura 12 - Amostra 1 - Transição 1 pelo Critério de Terzaghi.	30
Figura 13 - Amostra 1 - Transição 2 pelo Critério de Terzaghi.	31
Figura 14 - Amostra 1 - Transição 3 pelo Critério de Terzaghi.	32
Figura 15 - Amostra 1 - Transição 1 pelo Critério de Fell.	34
Figura 16 - Amostra 1 - Transição 2 pelo Critério de Fell.	35
Figura 17 - Amostra 1 - Transição 3 pelo Critério de Fell.	35
Figura 18 - Amostra 2 - Transição 1 pelo Critério de Fell.	36
Figura 19 - Amostra 2 - Transição 2 pelo Critério de Fell.	36
Figura 20 - Amostra 2 - Transição 3 pelo Critério de Fell.....	37

Figura 21 - Faixas de todos os materiais de transição da Amostras 1 pelo critério de Terzaghi.	39
Figura 22 - Faixas de todos os materiais de transição das Amostras 1 e 2 pelo critério de Fell (2005).	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Registro mundial de grandes barragens dos países membros do ICOLD.	9
Tabela 2 - Levantamento dos modos de ruptura até 1986, exceto Japão antes de 1930 e na China.	10
Tabela 3 - Categoria do solo base.	20
Tabela 4 – Critérios de filtragem.	20
Tabela 5 - Critérios de filtragem para solos dispersivos.	20
Tabela 6 - Critérios de segregação.....	22
Tabela 7 - Comparação entre o critério de Terzaghi e Fell (2005).....	23
Tabela 8 - Porcentagens passantes obtidas para o Ponto 2.	27
Tabela 9 - Porcentagens passantes obtidas para os Solo A, Solo B, Solo C e Solo D.....	29
Tabela 10 - Diâmetros retirados da faixa granulométrica da Amostra 1.	33
Tabela 11 - Diâmetros retirados da faixa granulométrica da Amostra 2.	33
Tabela 12 - Porcentagem passante dos materiais de transição da Amostra 1 pelo critério de Terzaghi.....	39
Tabela 13 - Porcentagem passante dos materiais de transição das Amostras 1 e 2 pelo critério de Fell (2005).....	40

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	4
1.1.1	Objetivos Específicos.....	4
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Barragens de terra: conceitos e definições.....	5
2.1.1	Barragem Homogênea.....	6
2.1.2	Erosão Interna.....	7
2.2	Acidentes de barragens.....	9
2.3	Segurança de barragens	13
2.4	Drenagem Interna.....	15
2.5	Crítérios de retenção baseados na distribuição de partículas	17
2.5.1	Crítério de Terzaghi.....	18
2.5.2	Crítério de Fell (2005)	18
2.5.3	Comparação entre os critérios de Terzaghi e Fell (2005)	23
3	Metodologia.....	24
3.1	Dimensionamento das transições geotécnicas.....	26
3.1.1	Ensaio de análise granulométrica	26
3.1.2	Crítério de Terzaghi.....	29
3.1.3	Crítério de Fell (2005)	32
4	Resultados	38
4.1	Crítério de Terzaghi	38

4.2	Critério de Fell (2005)	40
5	Conclusão	42
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	43
	Referências.....	44

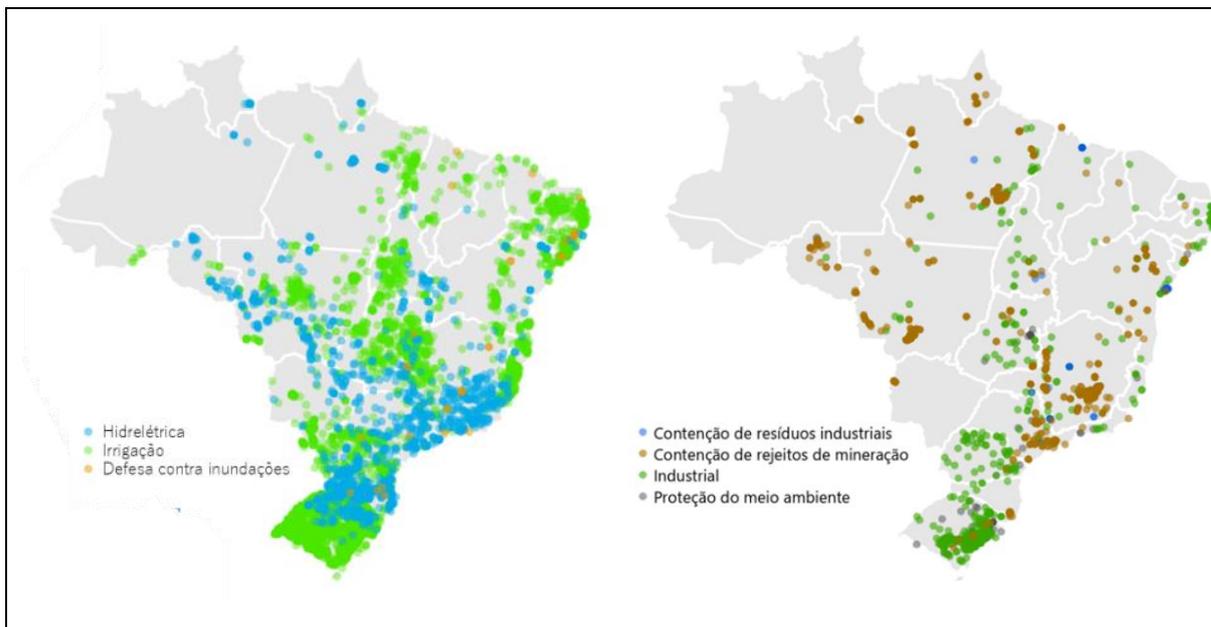
1 INTRODUÇÃO

As barragens são obras geotécnicas que tem como princípio à retenção e à acumulação de água, no qual podem ter duas ou mais finalidades em uma única estrutura, como armazenamento e abastecimento de água, fornecimento de água à indústria, irrigação, combate a incêndios, regularização e controle de cheias, recreio e navegação, geração de energia hidroelétrica, dessedentação, piscicultura e contenção de rejeito (SILVA, 2016).

Para Cruz (2004) a arte de projetar uma barragem está diretamente ligado ao controle de fluxo da água pelo conjunto barragem-fundação. Não controlar o fluxo resulta na saturação do aterro compactado, fazendo com que a barragem fique sujeita a elevados valores de poropressão e que conseqüentemente resulta na redução da resistência ao cisalhamento do solo podendo levar a estrutura à ruptura (SILVA, 2016).

No Brasil as mais relevantes contribuições no sentido de desenvolvimento de tecnologias de projeto, construção e operação de barragens são principalmente devidas à expansão de implantação de hidroelétricas a partir do final dos anos 1950 (SILVA, 2016). Atualmente o uso principal das barragens submetidas ao Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) que constam no Sistema Nacional de Informações sobre Barragens (SNISB), tem os maiores usos ligados à irrigação (34%), abastecimento humano (21%), hidrelétrica (14%) e contenção de rejeitos de mineração (8%) (ANA, 2022). Na Figura 1 possível observar a distribuição das barragens pelo país com base na função que ela exerce.

Figura 1 - Distribuição das barragens pelo país.



Fonte: Ana (2022)

Segundo o SNISB (2022) os estados do país que possuem um maior número de barragens cadastradas são: Rio Grande do Sul (10103), Mato Grosso do Sul (1894), Paraná (1206), Goiás (1132) e Minas Gerais (1037).

Minas Gerais é o segundo estado do país que contém o maior número de barragens com o CRI (Categoria de Risco) alto, sendo 306 estruturas nessa condição, sucedido apenas da Paraíba com 396 estruturas nessa categoria (SNISB, 2022). Vale ressaltar que o CRI de uma barragem aborda aspectos da estrutura que podem afetar a probabilidade de um acidente, como: aspectos de projeto, integridade estrutural, estado de conservação, operação e manutenção e atendimento ao Plano de Segurança (SNISB, 2022).

Para Foster, Fell e Spannagle (1998), o processo de erosão interna, foi a causa de quase metade dos casos de rupturas de barragens ocorridas no mundo. A maioria dessas rupturas aconteceu devido a progressão da erosão interna através do maciço, no qual o filtro granular continha uma granulometria inadequada ou então nem existia. É comum que o transporte de partículas finas possa acontecer onde há fluxo de água

do material mais fino para o mais grosso, entretanto, o carreamento em excesso de partícula é considerado uma patologia (SILVA, 2016).

Segundo Silva (2016) a principal defesa contra fluxos concentrados e preferenciais é a introdução de dispositivos internos de drenagem na barragem e na fundação. Para Cruz (2004) a afirmativa de que “a arte de projetar uma barragem é essencialmente a arte de controlar o fluxo” é válida, pois o projeto e dimensionamento do sistema de controle de fluxo e o sistema interno de drenagem deve ser prioridade, uma vez que este sistema está intimamente ligado à segurança da estrutura.

Para Araújo (2019) um dos principais requisitos de segurança que deve ser avaliado em barragens de terra, na fase de projeto, é o controle do fluxo de percolação de água, evitando que partículas de solo sejam arrastadas pela vazão. Os filtros granulares são um dos principais meios utilizados para proteger as partículas que são susceptíveis a processos de erosão interna (ARAUJO, 2019).

O dimensionamento adequado dos filtros granulares é fundamental para a segurança das estruturas, bem como das instalações e populações localizadas a jusante das barragens (ARAUJO, 2019). Com isso, há necessidade de pesquisas sobre métodos de dimensionamento para propor uma metodologia melhorada e segura contra processos de erosão interna (ARAUJO, 2019).

O filtro deve ter um projeto que possua a definição das granulometrias adequadas à proteção da granulometria do maciço. Um meio de definir essa proteção é através do critério de retenção baseados na distribuição de partículas, nesse trabalho foi considerado pelo autor a comparação de duas amostras a partir da aplicação de métodos empregados atualmente na engenharia a saber: Terzaghi (TERZAGHI e PECK, 1962) e Fell (FELL, MACGREGOR, et al., 2005) que é baseando nos critérios adotados por Sherard e Dunnigan (1985, 1989), USBR (1987) e USDA-SCS (1994).

1.1 Objetivo

O projeto terá como objetivo geral analisar as transições geotécnicas pelo critério de Terzaghi (TERZAGHI e PECK, 1962) e pelo critério de Fell (FELL, MACGREGOR, et al., 2005) que é uma adaptação dos critérios elaborados por Sherard e Dunnigan (1985, 1989), USBR (1987) e USDA-SCS (1994) em dois estudos de casos: uma amostra retirada do aterro de uma barragem de terra localizada em Ipeúna no estado de São Paulo, e outra amostra retirada de uma área de empréstimo adequada para ser utilizada em barragem de terra homogênea.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos pontuados têm como objetivo estruturar e embasar o desenvolvimento do estudo para que o propósito principal seja alcançado:

- Plotar os limites inferiores e superiores das curvas granulométricas dos agregados graúdos e miúdos segundo norma técnica;
- Avaliar a aplicabilidade do Critério de Terzaghi e do Critério adaptado por Fell (2005);
- Compilar informações necessárias sobre as amostras estudadas;
- Dimensionar e plotar em gráficos as camadas de transição geotécnicas para os solos base.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos itens 2.1 a 2.5 são apresentadas a revisão bibliográfica elaborada pelo autor, com vistas a subsidiar o desenvolvimento dos estudos de comparação dos Critério de Terzaghi e do Critério adaptado por Fell (2005), para transições geotécnicas.

2.1 Barragens de terra: conceitos e definições

Uma barragem pode ser definida como uma estrutura em um curso de água, permanente ou temporário, que tem como função a contenção ou acumulação de água de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos (ANA, 2016). Podem ser construídas para diversos fins, como produção de energia elétrica, regularização de cheias, contenção de resíduos sólidos entre outros (ANA, 2016).

A classificação de uma barragem pode partir de diferentes premissas, quanto a forma estrutural, aos materiais utilizados, às dimensões, à capacidade de armazenamento e a sua finalidade (SILVA, 2016).

As barragens construídas a partir de aterros são feitas de materiais naturais, como solo ou materiais processados, como rocha e brita. A partir de uma área de empréstimo esses materiais devem ser selecionados e transportados até o canteiro de obras, colocados no local definido pelo projeto e compactados (MEIRELLES, s.d.).

Segundo Quintas (2002) a estrutura da barragem de terra deve garantir:

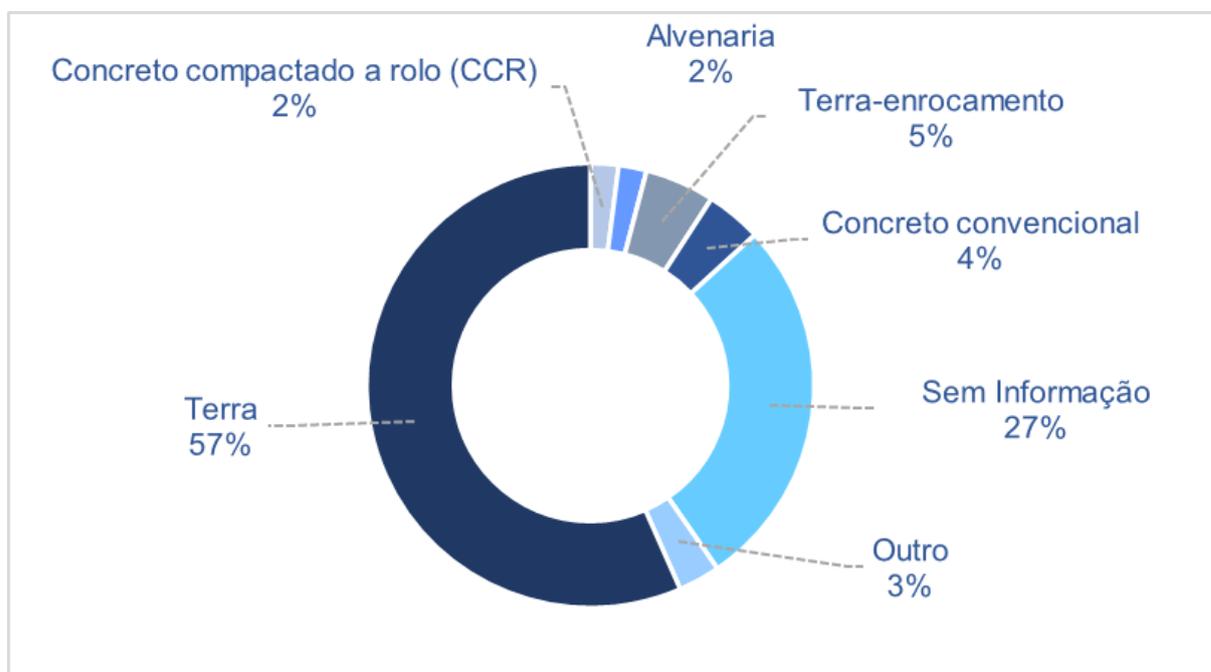
- Uma impermeabilização que impeça a perda de água excessiva através do maciço da barragem;
- Um projeto que garanta sua estabilidade;
- Que o talude à montante esteja protegido contra ondas;
- Sistemas de drenagem eficazes que protejam as barragens das poropressões;
- Um controle do assentamento da barragem ao longo do tempo.

Para o projeto e construção de barragens de terra, deve haver uma série de estudos detalhados que atendam diversos requisitos, como a análise de sua finalidade, as condições locais (topográfica, geotécnica e geológica) e os problemas

econômicos que permitem a escolha da localização e do tipo de barragem (ESTEVEES, 1964).

No Brasil, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) (2022) tem-se 22.654 barragens cadastradas. Conforme mostrado na Figura 2, a barragem de terra é a mais utilizada devido as condições topográficas, pois no país há vales muito abertos e uma grande disponibilidade de material terroso (ANA, 2022).

Figura 2 - Levantamento das barragens cadastradas no Brasil.



Fonte: Adaptado de ANA (2022).

2.1.1 Barragem Homogênea

As barragens de terra homogêneas são constituídas de um único tipo de solo e são muito utilizadas em fundações desfavoráveis, pois podem ser construídas sobre solos moles (MASSAD, 2003).

As barragens homogêneas são relativamente simples e econômicas de construir, pois requerem menos materiais e mão de obra em comparação com as barragens de materiais múltiplos (BIRCK, 2016). No entanto, elas podem ser menos eficazes do que outras barragens em termos de controle de vazão e resistência à erosão, pois não

possuem um núcleo central ou materiais de vedação que podem ajudar a proteger a barragem contra infiltrações de água (BIRCK, 2016).

Segundo Massad (2003), a linha freática neste tipo de barragem atinge o talude jusante, com isso, é necessário que haja uma drenagem eficiente com materiais permeáveis, por exemplo, filtros horizontais, verticais ou inclinados, drenos de pé, dentre outros. Visto que um dos problemas mais recorrentes nesse tipo de estrutura é a erosão interna (sendo o *piping* o modo de falha de maior ocorrência neste caso) no próprio corpo da barragem ou nas suas fundações (MASSAD, 2003).

Esse fenômeno é caracterizado pelo carreamento de partículas de solo na água em fluxo, de jusante para montante, no qual forma-se tubos de erosão que resultam em cavidades relativamente grandes na barragem, levando-as ao colapso (MASSAD, 2003).

2.1.2 Erosão Interna

Segundo Ladeira (2007) a ocorrência de falhas por *piping* é um fenômeno que surge devido à erosão regressiva. Esse processo é caracterizado pela formação de um tubo que se origina através do transporte de grumos de silte e argila, sendo que esse tubo se desenvolve no sentido de montante para jusante dentro de uma barragem que é composta por um maciço de terra compactada (LADEIRA, 2007). Conforme a água infiltra no solo compactado, o diâmetro desse tubo tende a aumentar. O termo sufusão (*suffusion*) é utilizado para descrever o início da erosão regressiva, quando ocorrem falhas concentradas no maciço de terra, devido à migração interna de partículas finas através do fluxo de descarga em solos instáveis (LADEIRA, 2007).

Evitar a ocorrência de *piping* é crucial e depende de diversos fatores determinantes, tais como o nível de compactação do solo, a correta graduação do tamanho das partículas em regiões de transição entre materiais com diferentes granulometrias, e o monitoramento adequado de parâmetros geotécnicos (LADEIRA, 2007). Todos esses aspectos devem ser levados em conta para prevenir a formação desse processo indesejável.

A erosão começa com algum evento externo ou problema estrutural na barragem que possa facilitar ou agravar o transporte das partículas de solo que formam o maciço pode ser ocasionado por falhas no solo, decorrentes de compactação insuficiente ou recalques, bem como por fluxos que ocorrem no lado de jusante da fundação ou do núcleo da barragem, ou ainda por fluxos concentrados que atravessam o núcleo, como afirmado por Hunter (2012) e FEMA (2015).

Quando a água penetra no solo a partir da região mais elevada, ela umedece o maciço e procura ativamente por caminhos que levem a áreas de menor pressão, que são conhecidos como caminhos de percolação (GOMES, 2019). Em determinados trechos, a força do fluxo pode ser tão forte que o solo da barragem fica saturado e os sedimentos finos são transportados junto com a água. Na região a jusante, se a força de percolação for maior que a resistência do material, ocorre a erosão (GOMES, 2019). A erosão ocorre, de jusante para montante, à medida que a corrente de água continua a arrastar o solo (GOMES, 2019).

A fase subsequente da erosão é influenciada pela interação entre a distribuição do tamanho das partículas do solo-base (ou seja, o núcleo central da barragem) e os materiais filtrantes (FELL, WAN, *et al.*, 2003; HUNTER, 2012). Essa fase inicia-se logo após o início da erosão e se estende enquanto o tubo de erosão permanece relativamente pequeno (ANDERSON e FERGUSON, 2015). Durante esse estágio, a taxa de progressão e o tamanho do tubo de erosão são influenciados pela erodibilidade do solo, pelos gradientes de inclinação e pela permeabilidade do material no qual a erosão está ocorrendo (KOVÁCS, 2018; FELL, WAN, *et al.*, 2003, FEMA, 2015).

Em relação à continuação da erosão, o processo erosivo avança na direção montante a partir do ponto inicial, formando uma rede de pequenos túneis no solo ou aterro (GOMES, 2019). À medida que esses túneis se conectam e atingem o reservatório ou rio, um túnel maior se forma, caracterizando a anomalia *piping* (ICOLD, 2013; FEMA, 2015).

O estágio de abertura da brecha é definido como o momento em que ocorre uma vazão descontrolada do reservatório e não há mais controle sobre a ruptura. Geralmente, todas as intervenções possíveis devem ter sido realizadas até esse ponto do processo de *piping* (PIMENTA FILHO, 2013).

O momento de abertura da brecha é aquele em que não é mais possível reverter ou reduzir a erosão. Nesse ponto, os esforços devem se concentrar na notificação das áreas afetadas por um possível acidente e no gerenciamento dos recursos para minimizar os impactos socioeconômicos e ambientais (GOMES, 2019)

2.2 Acidentes de barragens

Como citado por GUIDICINI, SANDRONI e MELLO (2021) o Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD/CIGB), apresentou, conforme a Tabela 1, que a China é a detentora da maior quantidade de grandes barragens no mundo, já o Brasil ocupa o quinto lugar desse levantamento.

Tabela 1 - Registro mundial de grandes barragens dos países membros do ICOLD.

País	Número de barragens
China	23.842
Estados Unidos	9.265
Índia	5.102
Japão	3.108
Brasil	1.392
República da Coreia (Coreia do Sul)	1.306
Canadá	1.170
África do Sul	1.114
Espanha	1.082
Turquia	972

Fonte: Adaptado de ICOLD (2016).

Conforme ICOLD (1974), das 2.531 barragens construídas entre 1900 e 1960 13,5% foram atingidas por acidentes, dos quais 2,3% foram desastres. Dentre o período de 1960 a 1973, 2,8% das 2.128 barragens que foram construídas nos EUA sofreram acidentes, ou seja, a incidência no período anterior caiu quatro vezes.

Entre 1800 e 1986, segundo estudos estatísticos, constatou-se que mais da metade das rupturas em barragens de terra e/ou enrocamento foram causadas por erosão interna, em todos os continentes (FOSTER, FELL e SPANNAGLE, 2000). Na Tabela 2 verifica-se que aproximadamente 54% dos acidentes que ocorreram após 1950 ocorreram devido a erosão interna seja pelo barramento ou fundação, enquanto o galgamento ocupa o segundo lugar com 32% dos casos conhecidos (FOSTER, FELL e SPANNAGLE, 2000).

Tabela 2 - Levantamento dos modos de ruptura até 1986, exceto Japão antes de 1930 e na China.

Modo de ruptura	Total de rupturas (modo de ruptura conhecido)	Rupturas antes de 1950	Rupturas entre 1950 e 1986
	(%)	(%)	(%)
<i>Piping</i> através do barramento	32,5	29,3	35,5
<i>Piping</i> do barramento para a fundação	1,7	0	3,4
Piping através da fundação	15,4	15,5	15,3
Galgamento (<i>overtopping</i>)	34,2	36,2	32,2
Vertedouro	12,8	17,2	8,5
Abalo sísmico	1,7	0	3,4
Deslizamento do talude a jusante	3,4	6,9	0
Deslizamento do talude a montante	0,9	0	3,4
Total	102,6	105,1	100

Fonte: Adaptado de FOSTER, FELL e SPANNAGLE (2000).

Vale ressaltar que nesse levantamento foram considerados apenas as barragens com altura superior a 15,00m e foram excluídos os dados referentes a barragens construídas no Japão antes de 1930 e na China devido a imprecisão das informações. Também, deve-se pontuar que as porcentagens não necessariamente somam 100%, uma vez que algumas barragens tiveram múltiplos modos de falha em sua ruptura (FOSTER, FELL e SPANNAGLE, 2000).

No Brasil, O Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB), hoje Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), começou a atuar com efetividade no início dos anos

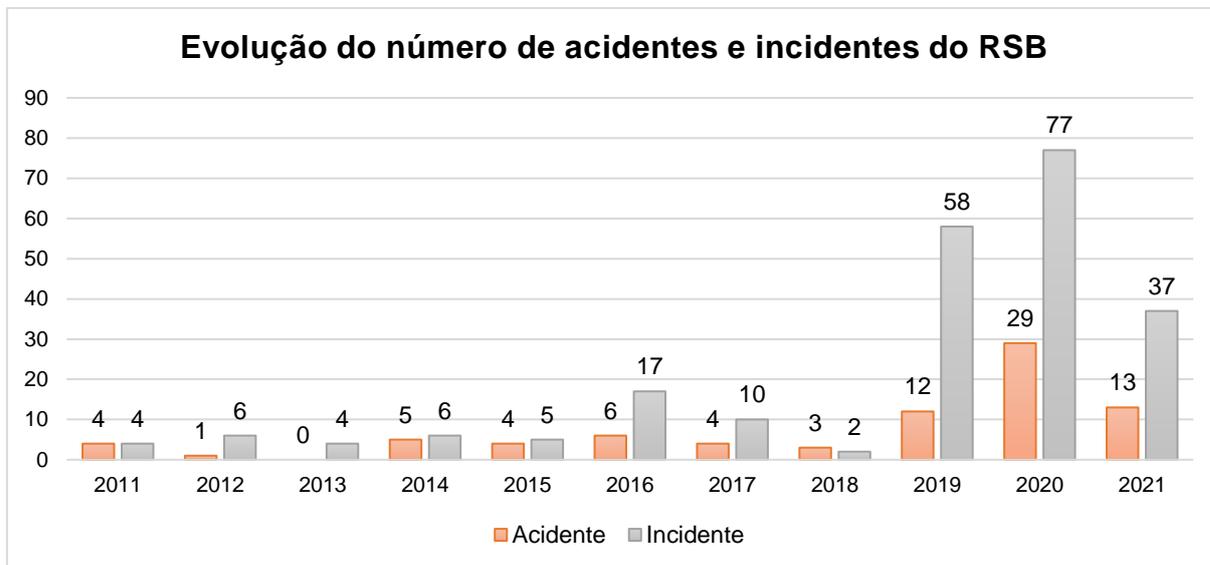
1960. Entretanto, segundo GUIDICINI, SANDRONI e MELLO (2021), existe uma escassez de documentos sobre acidentes no país devido a diversos fatores, como o fato de que algumas barragens de pequeno e médio porte foram implantadas sem registro de projeto, localizadas em regiões distantes dos centros urbanos. Com isso, pouquíssimos casos alcançavam o registro em noticiários, como em circunstâncias que afetavam as condições de vida das populações ribeirinhas ou que interrompem as vias de comunicação locais (GUIDICINI, SANDRONI e MELLO, 2021).

A Agência Nacional de Águas (ANA) a partir da promulgação da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, emiti anualmente o Relatório de Segurança de Barragens, sendo que a primeira edição referente ao ano de 2011 (GUIDICINI, SANDRONI e MELLO, 2021).

Segundo a ANA (2022) nos anos de 2019, 2020 e 2021, conforme demonstrado na Figura 3, o número de acidentes e incidentes foram superiores aos anos anteriores, possivelmente, isso deve ao conjunto de alguns fatores como o aumento de eventos de cheias, a má conservação de barragens e o aumento do conhecimento dos órgãos fiscalizadores e do CENAD (Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres).

Vale ressaltar que de acordo com o art. 2º da Resolução nº 144/2012 do CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos), um acidente pode ser definido como o comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável do conteúdo de um reservatório, que resulta no colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa. Já um incidente é qualquer ocorrência que afete o comportamento da barragem ou estrutura anexa que caso não seja controlada pode vir a causar um acidente (ANA, 2022).

Figura 3 - Levantamento de acidentes e incidentes.



Fonte: Adaptado de ANA (2022)

O relatório de segurança de barragens cita que a maioria dos acidentes e incidentes, são as cheias, erosões ou percolação excessiva, problemas em vertedores, inundações de galerias e rompimento do canal de adução. Na Figura 3, observa-se o aumento dos acidentes com barragens no decorrer dos anos (ANA, 2020). Dentre esses acidentes, estão englobados o rompimento de barragens de grande porte, como o da barragem de Fundão, situada no complexo de mineração da Samarco em Mariana-MG, que ocorreu em 2015 e da Mina do Córrego de Feijão, localizada em Brumadinho que se rompeu em 2019, e há também, muitos incidentes que são ocorrências que podem levar a acidentes.

Com o objetivo de priorizar ações captando a atenção do alto escalão da Administração Pública nas diversas esferas de governo, a ANA solicita aos órgãos fiscalizadores a lista das barragens que mais os preocupam, contendo algum comprometimento estrutural importante que impacte a sua segurança, com um breve relato sobre cada uma, incluindo os possíveis impactos (ANA, 2022).

Vale ressaltar que as barragens que constam nessa lista não necessariamente apresentam risco de rompimento (ANA, 2022). Em 2021, foi reportada a existência de 187 barragens que os preocupam de forma mais acentuada. Elas estão distribuídas

em 22 estados, com destaque para Minas Gerais (66), Goiás (18), Pará (18) e Pernambuco (15) (ANA, 2022).

2.3 Segurança de barragens

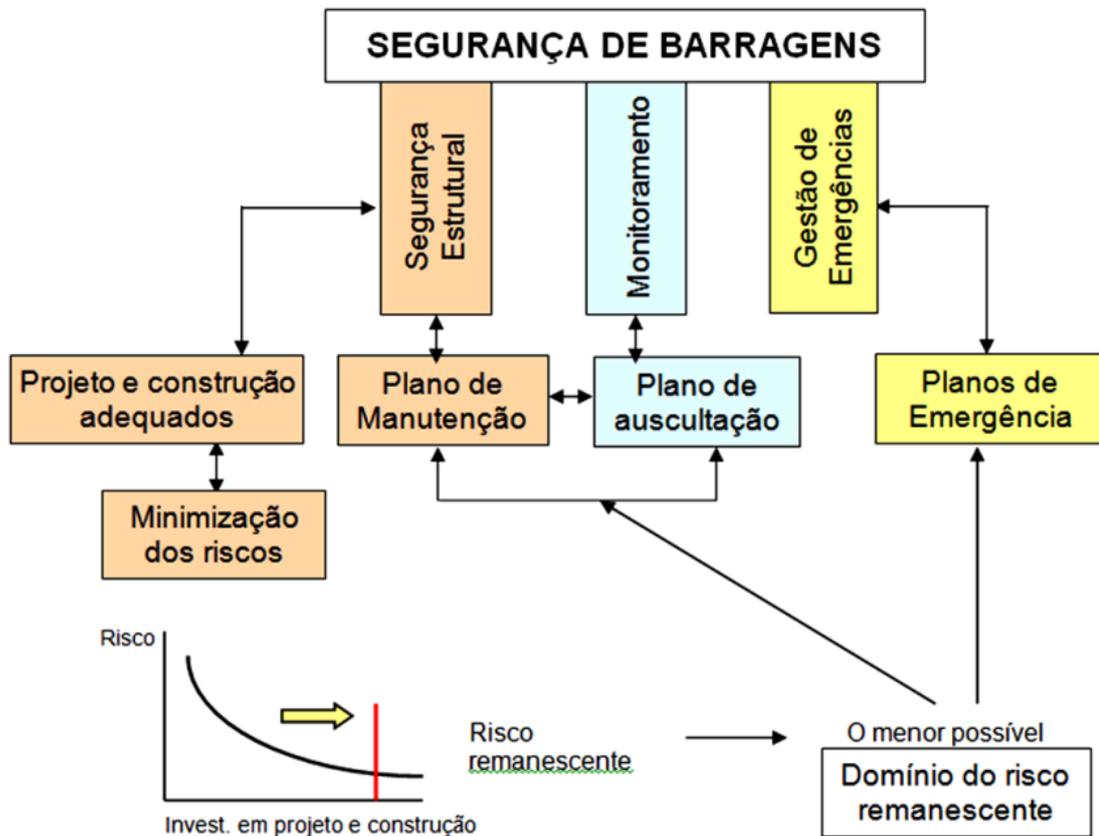
Projetos de construção e operação de barragens devem apresentar como principal objetivo a segurança, visto que acidentes em barragens podem acarretar graves desastres, tanto ambientais como também econômicos (SILVA, 2016).

Para a realização desse tipo de projeto é necessário o envolvimento de profissionais de diversas áreas como hidrológicos, hidráulicos, estruturais e geotécnicos (SILVA, 2016).

Para Fiorini (2008) é fundamental para a estrutura de uma barragem que haja uma boa concepção geral do projeto e um arranjo e dimensionamento adequado, visto que erros ou levantamentos insuficientes podem ocasionar graves consequências. Fusaro (2007) acredita que engenheiros geotécnicos sempre têm que lidar com o desconhecido, visto que não é possível controlar integralmente os materiais que trabalham, em virtude de estes, provêm de jazidas e áreas de empréstimo no geral não uniformes.

Biedermann (1997) acredita que a segurança de barragens pode ser obtida através da junção de três pilares segurança estrutural (projeto, construção e manutenção adequados), monitoramento e gestão de emergências, como demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Princípios básicos de segurança de barragens.



Fonte: adaptado de Biedermann (1997) por Leite (2019).

Segundo Fusaro (2007) no período de projeto e construção de barragens é preciso que sejam feitos investimentos de forma que os riscos associados a cada estrutura civil sejam minimizados. Entretanto, mesmo havendo o projeto e a construção adequada, existe um risco posterior no qual é necessário o controle através de acompanhamento e avaliação permanentes do desempenho das barragens (LEITE, 2019). Esse processo é normalmente denominado de auscultação de barragem e tem como princípio auxiliar nas atividades de observação, detecção e caracterização de deteriorações que venham a ocorrer e possam aumentar o potencial de risco de uma estrutura (LEITE, 2019).

Leite (2019) acredita que o monitoramento da estrutura só é efetivo se, quando for observado a necessidade de manutenção, seja por melhoria ou reparo, estas forem

realizadas em tempo hábil. O terceiro pilar da segurança, gestão de emergência, afirma que a segurança só pode ser garantida por meio de medidas integradas de gestão de riscos tomadas pelas partes interessadas do sistema, ou seja, os responsáveis pela barragem, instituições reguladoras e o público (LEITE, 2019).

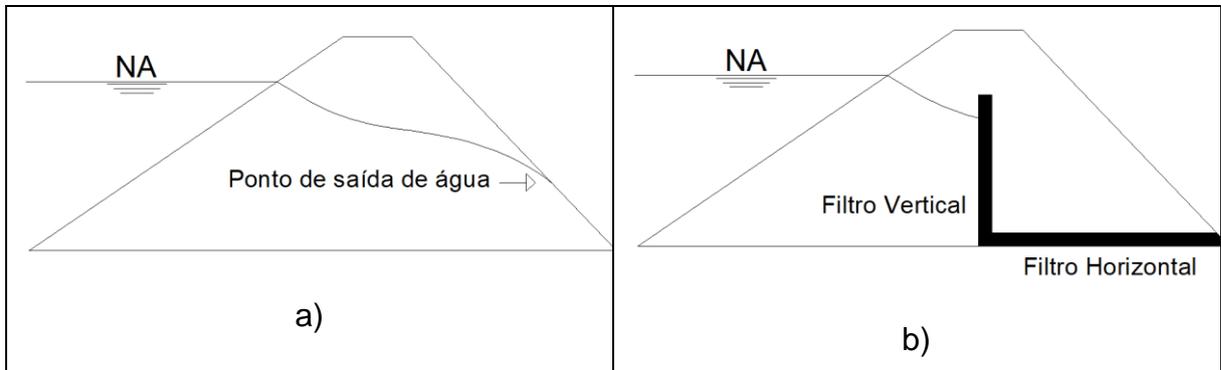
2.4 Drenagem Interna

A drenagem interna é muito importante para a operação de barragens de terra, pois ao ser bem dimensionado é possível realizar o controle de percolação no aterro. A não utilização desse sistema pode ocasionar a elevação de poropressões e efeito de erosão interna regressiva ou “*piping*” devido a linha freática atingir o talude de jusante (GUIMARÃES, 2021).

Em seu trabalho Silva (2016) através de diversos experimentos em laboratório concluiu que a presença de filtros bem projetados pode eliminar as chances da ocorrência de *piping*. Além disso, ressaltou que os materiais utilizados como filtro e dreno devem ser estudados para que possam desempenhar com eficiência suas funções de filtragem, drenagem e proteção (SILVA, 2016).

As barragens, inicialmente eram construídas sem filtro conforme ilustrado no item “a” Figura 5, nesse caso como não há controle do caminho da freática, em função da perda de carga no interior do maciço a linha de fluxo intercepta a face do talude jusante. O primeiro a sugerir projetos de filtro foi o engenheiro geotécnico Terzaghi em 1962. Para evitar a erosão ele propôs a combinação de filtro vertical e horizontal que intercepta o fluxo de água antes que chegue ao talude de jusante conforme demonstrado no item “b” da Figura 5 (MASSAD, 2003).

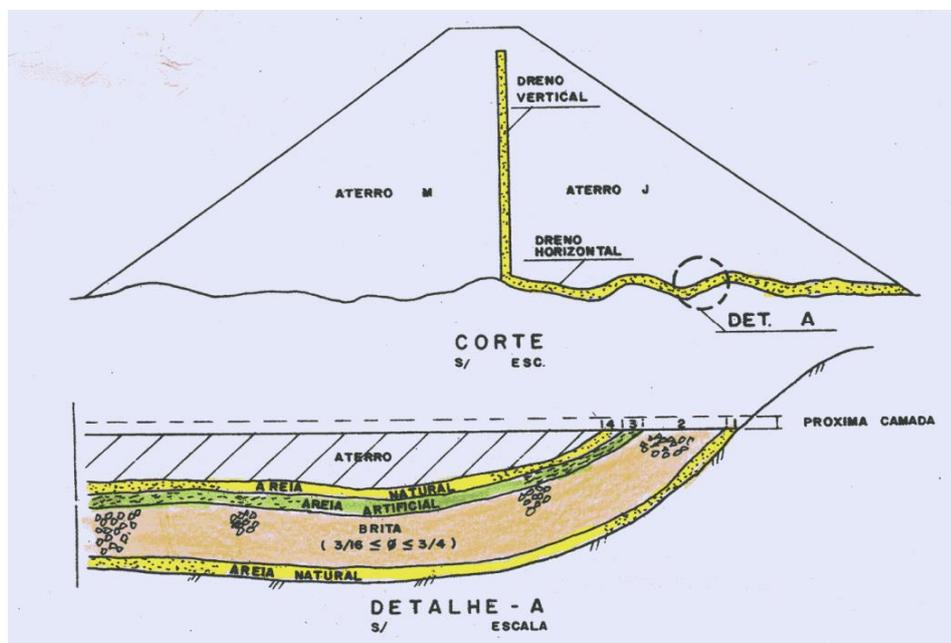
Figura 5 - Histórico filtro de barragem: a) barragem sem filtro b) barragem com filtro horizontal e vertical.



Fonte: Adaptado de Massad (2003).

Geralmente, os filtros detêm camadas de transições geotécnicas compostas por materiais granulares que tem como funções reter partículas evitando que ocorra o carreamento do solo do maciço e possibilitar a drenagem da água e sua percolação conforme apresentado no exemplo da Figura 6 (FIDELES e MALVEIRA, 2018).

Figura 6 - Exemplo de um detalhamento das transições geotécnicas de um dreno vertical.



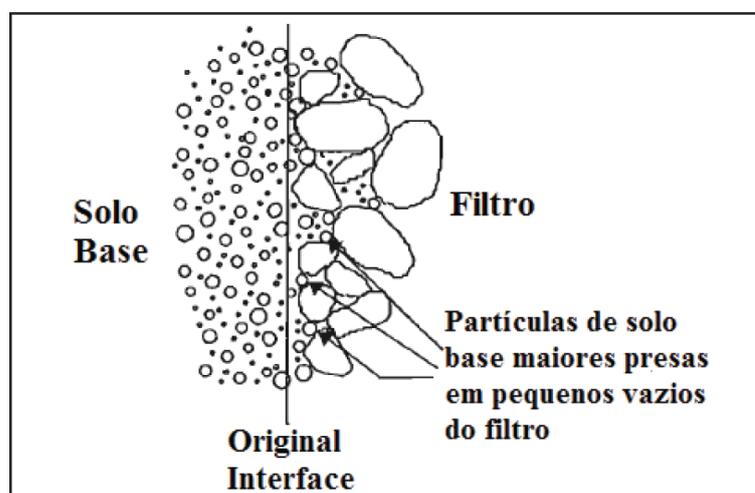
Fonte: Rosa, Henderson e Anders (1983).

Segundo Raut e Indraratna (2008) o projeto de um filtro deve definir granulometrias adequadas à proteção da granulometria do maciço, ou seja, busca-se granulometrias que possuam vazios suficientemente grandes para que haja o livre escoamento da água e suficientemente fino para conter a migração das partículas de solo base.

2.5 Critérios de retenção baseados na distribuição de partículas

Os critérios de retenção baseados na distribuição de partículas têm como objetivo relacionar os diâmetros das partículas do filtro com os diâmetros das partículas do solo base, a partir da curva de distribuição granulométrica dos materiais (ARAUJO, 2019). O solo bem graduado é de grande importância devido as forças de percolação da água, pois as partículas médias podem ser transportadas através do filtro. Entretanto um filtro bem dimensionado bloqueia essas partículas com seus vazios, e posteriormente reterão partículas finas, conforme Figura 7 (PIMENTA FILHO, 2013).

Figura 7 - Interface bem graduada.



Fonte: Adaptado por Fideles e Malveira (2017) de Locke (2001).

Em seguida serão apresentadas duas metodologias Terzaghi e Fell (2005) que se baseiam nos critérios de retenção baseados na distribuição de partículas.

2.5.1 Critério de Terzaghi

Segundo Araújo (2019) o engenheiro geotécnico Karl Von Terzaghi é considerado por diversos autores o precursor no tema de dimensionamento de filtros. O critério de Terzaghi (TERZAGHI e PECK, 1962) adotado em projetos de filtros granulares é baseado em testes envolvendo areias uniformes como materiais. Este método tem como base duas premissas:

- filtragem: para evitar o transporte de partículas erodidas, os poros internos do filtro devem ser pequenos o suficiente para que o diâmetro D_{15F} equivalente a 15% da partícula mais fina do filtro seja até quatro vezes o diâmetro que equivale a 85% (D_{85SB}) das partículas mais finas do solo base, D_{85SB} conforme apresentado na Equação 1 (ARAUJO, 2019).

$$\frac{D_{15F}}{D_{85SB}} \leq 4 \text{ ou } 5, \text{ Equação 1.}$$

- permeabilidade: com o objetivo de permitir a drenagem da água os poros do filtro devem ser suficientemente grandes, de maneira que o diâmetro que corresponda a 15% das partículas finas do filtro, D_{15F} , deverá ser pelo menos quatro vezes o diâmetro que equivale a 15% (D_{15SB}) das partículas mais finas do solo base, D_{15SB} conforme apresentado na Equação 2 (ARAUJO, 2019).

$$\frac{D_{15F}}{D_{15SB}} \geq 4 \text{ ou } 5, \text{ Equação 2.}$$

2.5.2 Critério de Fell (2005)

O critério de Fell (FELL, MACGREGOR, *et al.*, 2005) também tem como objetivo cumprir as premissas de filtragem e permeabilidade baseando-se nos critérios adotados por Sherard e Dunnigan (1985, 1989), USBR (1987) e USDA-SCS (1994). O autor modificou o critério de USDA-SCS (1994) alterando os limites de solos base para solos dispersivos, conforme proposto por Foster (1999) and Foster and Fell

(1999a). Vale ressaltar que os Grupos de Solo base são renomeados 1, 2A, 3A e 4 para distingui-los daqueles usados por Sherard e Dunnigan (1985, 1989).

O critério de Fell (2005) tem como objetivo determinar os limites de granulometrias do filtro a partir das seguintes etapas:

- Etapa 1:

Traçar a faixa granulométrica do solo base que será estudado as transições geotécnicas. É necessário usar amostras suficientes para definir a faixa granulométrica para o solo ou solos base. Para fins de filtragem, projete o filtro usando o solo base que requer o menor tamanho de D_{15F} . Para o critério de permeabilidade baseie o projeto do solo base em um tamanho D_{15SB} representativo (representado pelo valor mediano).

- Etapa 2:

Deve-se verificar qual a porcentagem passante na curva granulométrica está acima da peneira nº 4 (#4 – 4,75mm). Caso a porcentagem seja 100% deve-se prosseguir para a Etapa 4, entretanto se o solo base conter cascalho (material com granulometria superior a 4,75 mm) deve-se aplicar a etapa 3.

- Etapa 3:

É necessário ajustar as faixas granulométricas para solos base que tenham partículas maiores que o da peneira de 4,75 mm, seguindo as seguintes premissas:

- a. Obtém-se um fator de correção dividindo por 100 a porcentagem passante na peneira de 4,75 mm;
- b. Multiplica-se a porcentagem passante de cada peneira do solo base menor que a peneira 4,75 mm pelo fator de correção determinado acima;
- c. Plota-se essas porcentagens ajustadas para obter uma nova curva granulométrica ajustada;
- d. A partir da curva ajustada deve-se determinar a porcentagem que passa pela peneira de 0,075 mm na Etapa 4.

- Etapa 4:

A partir da porcentagem passante da peneira n° 200 (#200–0,075 mm) deve-se classificar o solo base em uma das categorias demonstradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Categoria do solo base.

Categoria do solo base	% <0,075 mm (após reclassificação, quando aplicável)	Descrição do solo base
1	>85	Siltes e argilas finas
2A	35–85	Areias siltosas e argilosas, argilas arenosas, argilas, siltes, areia e pedregulhos
4A	15–35	Areias siltosas e argilosas e pedregulhos
3	<15	Areias, cascalhos e pedregulhos

Fonte: Adaptado de FELL, MACGREGOR, *et al.*, 2005.

- Etapa 5:

Para satisfazer os requisitos de filtração, tem-se que determinar o tamanho máximo permitido de D_{15FMAX} para o filtro de acordo com a Tabela 4 e no caso de solos dispersivos de acordo com a Tabela 5.

Tabela 4 – Critérios de filtração.

Categoria do solo base	Critérios de filtração
1	$\leq 9 \times D_{85SB}$, mas não $<0,2$ mm
2A	$\leq 0,7$ mm
3	$\leq 4 \times D_{85SB}$ solo base após reajuste
4A	$[(35 - A) / (35 - 15)] \times [(4 \times D_{85SB}) - 0,7] + 0,7$; A = % passante na peneira 0,075 mm após ajuste (se $4 \times D_{85SB}$, caso $4 \times D_{85SB}$ seja $< 0,7$ mm, deve-se usar 0,7 mm)

Fonte: Adaptado de FELL, MACGREGOR, *et al.*, 2005.

Tabela 5 - Critérios de filtração para solos dispersivos.

Categoria do solo base	Critérios de filtração
1	$6 \times D_{85B}$ para solos dispersivos
2A	0,5 mm para solos dispersivos.
3	$\leq 4 \times D_{85B}$ solo base após reajuste
4A	$(((35 - A) / (35 - 15)) - 0,7 \text{ mm}) + 0,7 \text{ mm}$; A = % passante na peneira 0,075 mm após nivelamento (se $4 \times D_{85B}$, caso seja menor que 0,7 mm, deve-se usar 0,7 mm)

Fonte: Adaptado de FELL, MACGREGOR, *et al.*, 2005.

- Etapa 6:

Para que o filtro seja suficientemente permeável é necessário adotar antes do ajuste, o critério apresentado na Equação 3.

$$D_{15FMIN} \geq 4 \times D_{15SB}, \text{ mas não } \leq 0,1 \text{ mm, Equação 3}$$

Além do mais, é necessário que haja de 2% a 5% de finos passantes na peneira 0,075. Com isso, para este esse trabalho será adotado o critério apresentado na Equação 4.

$$D_{5FMIN} \geq 0,075 \text{ mm, Equação 4.}$$

- Etapa 7:

A largura da faixa do filtro deve ser mantida relativamente estreita em toda a sua extensão para evitar o uso de solo com falhas ou lacunas na graduação, entretanto deve ser largo o suficiente para permitir as condições de manuseio e construtibilidade. Para isso, deve-se seguir o critério de CNU e os limites das Equações 5 e 6.

- $\frac{D_{15FMÁX}}{D_{15FMÍN}} \leq 5$, Equação 5 ou $\frac{D_{15FMÁX}}{D_{15FMÍN}} \leq 60\%$, Equação 6;
- Faixa de filtro com CNU (Coeficiente de Uniformidade) ≤ 6 .

- Etapa 8:

Com o objetivo de evitar a segregação deve-se usar nas zonas de filtro uma largura $> 2\text{m}$ ou espessura de $0,5\text{m}$ e adotar o critério da Equação 7:

$$D_{100MÁX} \leq 75 \text{ mm, Equação 7.}$$

Para filtros estreitos e finos (especialmente os filtros Zona 2A) é utilizado um tamanho máximo de 37mm ou 50mm . Para o cálculo do $D_{10FMÍN}$ preliminar tem-se a Equação 8:

$$D_{10FMÍN} = \frac{D_{15FMÍN}}{1,2}, \text{ Equação 8.}$$

O fator de 1,2 é baseado na suposição de que a inclinação da linha que conecta $D_{15FMÍN}$ e $D_{10FMÍN}$ deve estar em um coeficiente de uniformidade de aproximadamente

6. A partir do $D_{10FMÍN}$ é possível determinar o valor de $D_{90FMÁX}$ com o auxílio da Tabela 6.

Tabela 6 - Critérios de segregação

Categoria de solo base	Se $D_{10FMÍN}$ (mm)	Então o máximo de $D_{90FMÁX}$ é: (mm)
Todas as Categorias	<0,5	20
	0,5 - 1,0	25
	1,0 - 2,0	30
	2,0 - 5,0	40
	5,0 - 10,0	50
	>10	60

Fonte: Adaptado de FELL, MACGREGOR, *et al.*, 2005.

- Etapa 9:

Posteriormente é preciso plotar os pontos necessários e conectar os pontos de controle determinados nos passos anteriores para formar um projeto preliminar para o limite inferior e superior da faixa do filtro. Para concluir o projeto é preciso extrapolar as curvas grosseiras e finas para o valor 100 por cento mais fino. Com isso a faixa obtida a partir desses pontos são os limites do material representativo para a transição geotécnica do solo base a ser protegido.

A faixa granulométrica que é obtida passa a ser chamada de Transição. Caso a faixa de transição seja inferior ao material que vai ser protegido, outras camadas de transição devem ser determinadas, com os mesmos passos citados anteriormente.

Com isso, o material definido como “Transição 1”, passa a ser considerado como o novo solo base, permitindo o cálculo da “Transição 2”. O processo é aplicado repetidamente até que sejam atendidas as condições de conexão entre o solo base e o material mais grosseiro.

Para situações em que filtros próximos dos limites permitidos estão sendo contemplados, ou sendo verificado em uma barragem existente, recomenda-se que os testes de não-erosão, conforme descrito por Sherard e Dunnigan (1985) seja realizado. Esse teste é importante para solos de granulação fina, no qual a separação dos limites de não-erosão e erosão contínua é pequena e para solos dispersivos,

devido à quantidade limitada de testes sobre os quais os critérios de design são baseados.

2.5.3 Comparação entre os critérios de Terzaghi e Fell (2005)

Com base na revisão bibliográfica realizada, foi possível observar que os dois métodos se diferenciam em alguns aspectos, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Comparação entre o critério de Terzaghi e Fell (2005).

Características	Terzaghi	Fell (2005)
Aplica a todos os materiais	não	sim
Complexibilidade de desenvolvimento do método	não	sim
Restrição de limites superiores para faixa granulométrica	não	sim

Fonte: Autor.

O método de Terzaghi não consegue ser aplicado em todos os materiais sendo necessário adotar outros métodos para dimensionamento, como o de Fell (2005). Um exemplo é o material abordado na Amostra 2, que devido as suas características granulométricas, não é possível adotar o critério de Terzaghi para o dimensionamento.

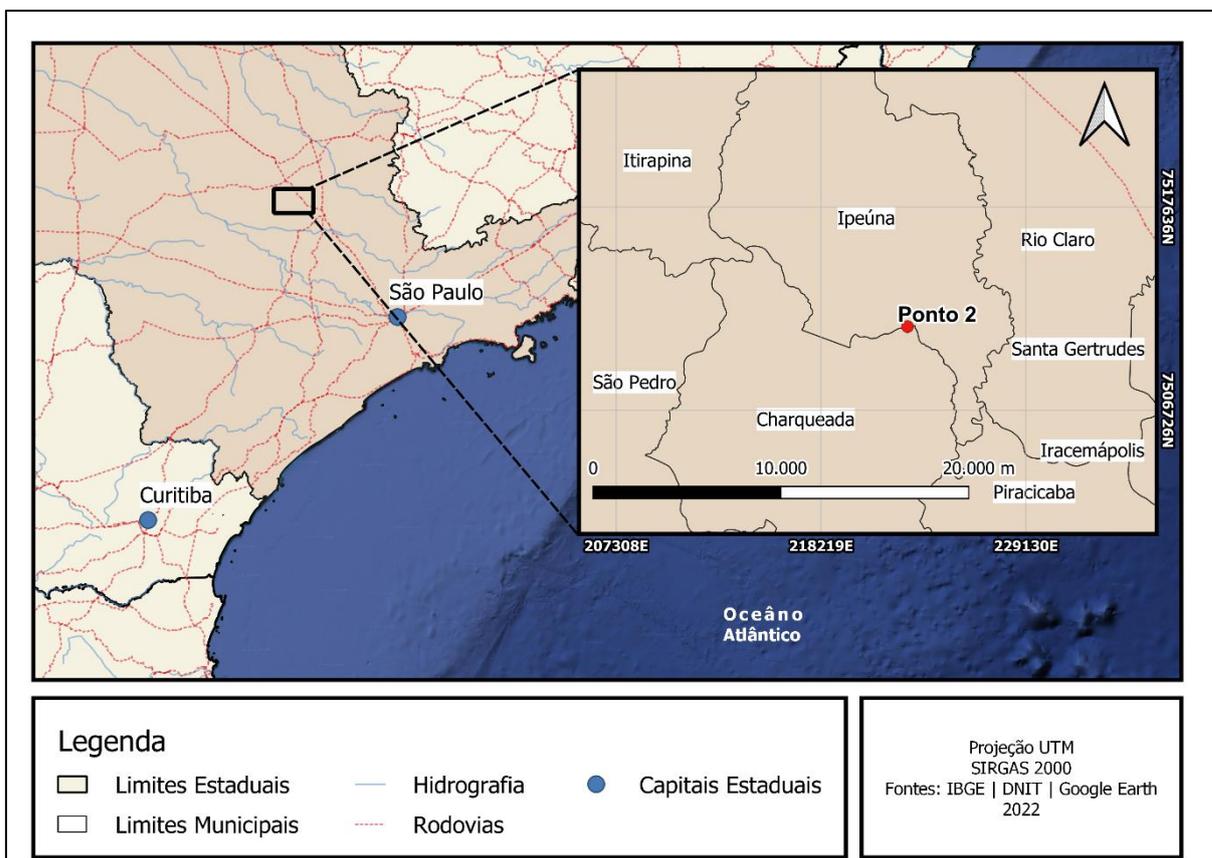
Devido o critério de Fell (2005) possuir mais etapas e critérios a serem observados para o dimensionamento das camadas de transição ele acaba sendo mais complexo que o método de Terzaghi. Apesar disso, o fato do critério de Fell (2005) estabelecer mais critérios e mais limites para a faixa granulométrica faz com que o dimensionamento seguindo esses passos seja mais assertivo.

3 METODOLOGIA

Para os estudos de caso, adotados neste trabalho, foram considerados uma barragem de terra existente estudada por Camarero (2016) em sua Dissertação de Mestrado e amostras de solo residual de basalto que foram analisadas no Trabalho de Conclusão de Curso de Bernardi (2006).

Para o presente trabalho utilizou-se dados da amostra denominada Ponto 2 no trabalho citado de Camarero (2016). Essa amostra foi retirada da crista da barragem de terra localizada na zona rural do município de Ipeúna – SP, a cidade de Ipeúna está a 195km da cidade de São Paulo conforme Figura 8.

Figura 8 – Localização do Ponto 2.



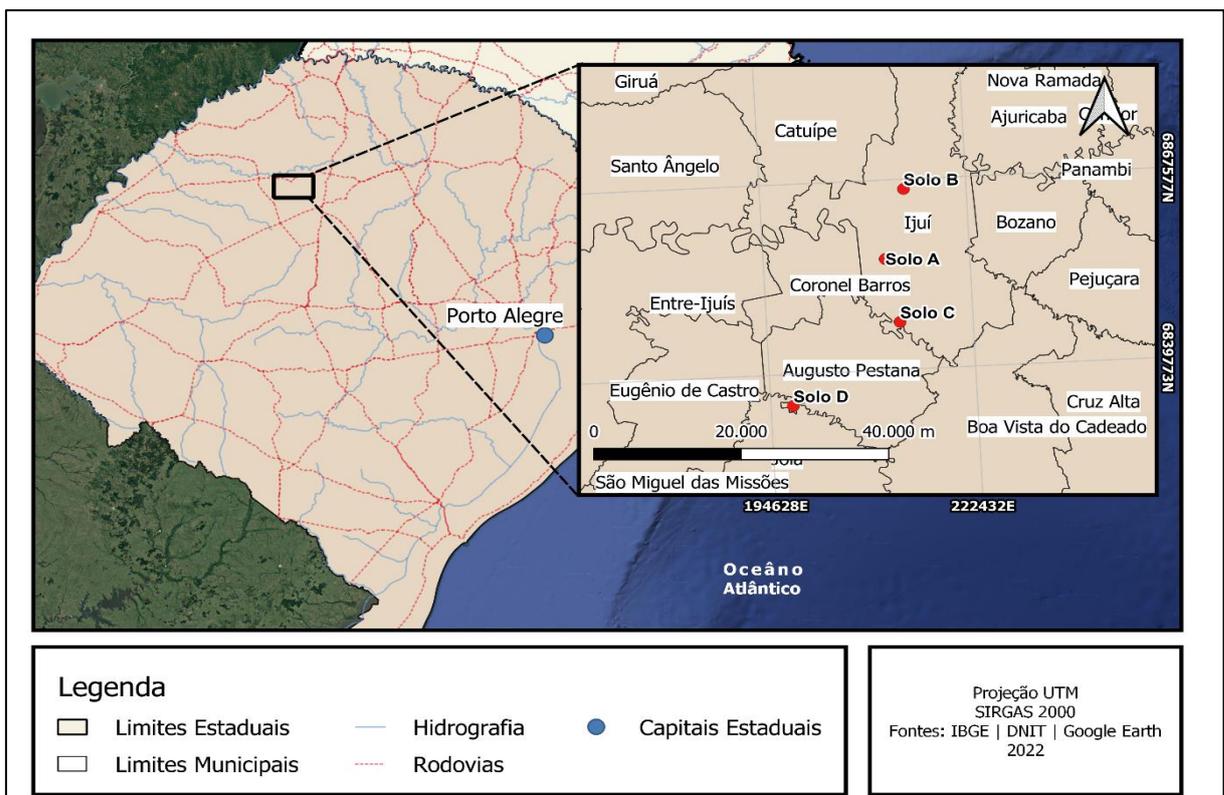
Fonte: Adaptado de Camarero (2016).

A estrutura está situada na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba a barragem de Ipeúna represa o Córrego da Fazenda Covitinga que é um afluente do Ribeirão da

Água Vermelha, que é um afluente do Rio Corumbataí que por sua vez desemboca no Rio Piracicaba (CAMARERO, 2016).

O estudo de Bernardi (2006) analisou 4 amostras de solo residual de basalto denominadas de Solo A, Solo B, Solo C e Solo D, que estão localizadas, conforme Figura 9 nas cidades de Ijuí e Augusto Pestana no estado do Rio Grande do Sul, que estão aproximadamente a 400 km da capital do estado, Porto Alegre.

Figura 9 - Localização do Solo A, Solo B, Solo C e Solo D.



Fonte: Adaptado de Bernardi (2006)

A partir de diversos ensaios de caracterização física, cisalhamento direto permeabilidade dentre outros, Bernardi (2006) conclui que quando compactado o material estudado possui propriedades mecânicas e hidráulicas adequadas para ser utilizado na construção de obras de terra, como barragens para geração de energia elétrica, contenção de rejeitos e/ou reservatórios de água para abastecimento e irrigação (açudes).

Vale ressaltar que foram escolhidas essas amostras devido à ausência de dados de barragens construídas em operação no território nacional que são de domínio das empresas proprietárias, foi considerado a utilização de dados disponíveis em bases públicas.

Por este motivo, a partir de pesquisas em publicações, livros, etc. o autor optou por utilizar dados de duas amostras de localidades diferentes, com vistas a avaliar as diferenças entre os métodos, mas também verificar a eficácia dos dimensionamentos em função dos diferentes litotipos do território nacional.

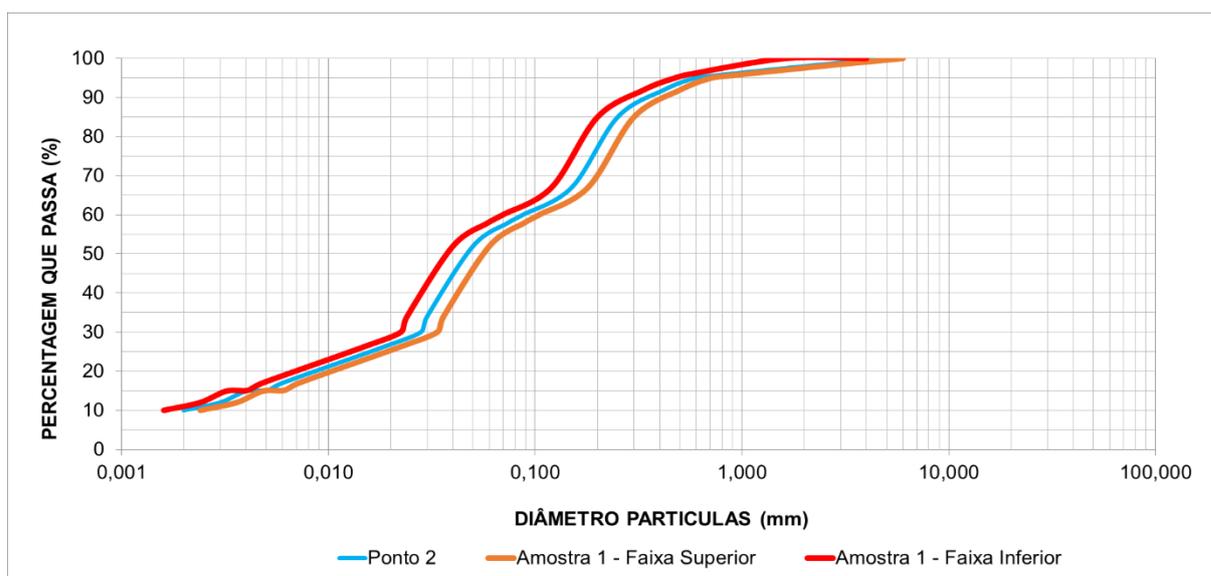
3.1 Dimensionamento das transições geotécnicas

3.1.1 Ensaios de análise granulométrica

3.1.1.1 Análise 1 – Amostra retirada na cidade de Ipeúna

A fim de uma análise eficiente da amostra, para este trabalho o autor criou uma faixa superior e inferior de $\pm 20\%$ com base nas curvas de distribuição granulométrica do material obtido do Ponto 2 apresentado na dissertação de Camarero (2016), como demonstrado na Figura 10.

Figura 10 - Curva de distribuição granulométrica do Ponto 2 e Amostra 1.



Fonte: Adaptado de Camarero (2016).

O ensaio da análise granulométrica foi realizado por Camarero (2016) de acordo com a ABNT NBR 7181/1984, no Ponto 2, no qual ele obteve as porcentagens passantes apresentadas Tabela 8.

Vale ressaltar que apesar da norma ABNT NBR 7181 ter tido uma revisão no ano de 2016, Camarero (2016) utilizou a versão anterior de 1984 pois a versão recente ainda não estava disponível quando realizou seus ensaios.

Tabela 8 - Porcentagens passantes obtidas para o Ponto 2.

Ponto 2	
D(mm)	% Passante
4,760	99,380
2,000	98,250
1,190	96,920
0,590	94,730
0,420	92,490
0,297	87,490
0,250	84,340
0,149	66,620
0,053	53,730
0,028	30,130
0,020	27,260
0,015	24,390
0,0110	21,520
0,0077	18,650
0,0055	15,780
0,0038	14,350
0,0028	11,480
0,0020	10,040

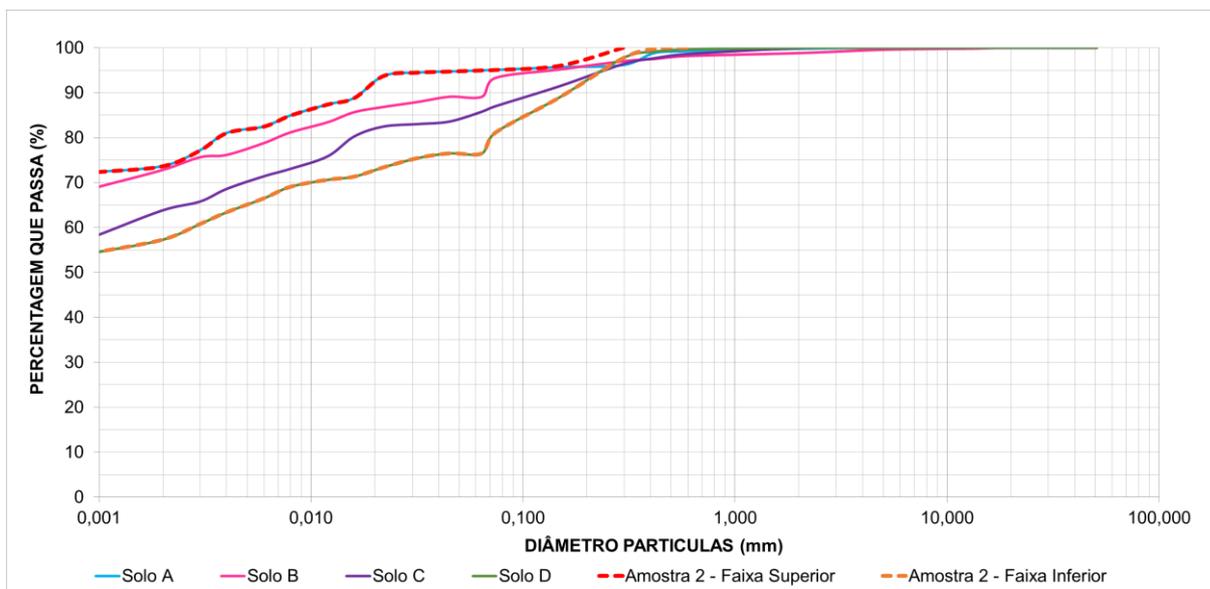
Fonte: Adaptado de Camarero (2016).

3.1.1.2 Análise 2 - Amostra retirada nas cidades nas cidades de Ijuí e Augusto Pestana

A fim de se obter uma análise efetiva abrangendo toda a amostra, para este trabalho o autor criou uma faixa superior e inferior com base nas curvas de distribuição granulométrica do Solo A, Solo B, Solo C e Solo D apresentada na dissertação de

Bernardi (2006). Essa nova faixa granulométrica será nomeada pelo autor como Amostra 2, como demonstrado na Figura 11.

Figura 11 - Curva de distribuição granulométrica do Solo A, Solo B, Solo C, Solo D e Amostra2.



Fonte: Adaptado de Bernardi (2006).

Em seu trabalho Bernardi (2006) explica que a caracterização física do Solo B, Solo C e Solo D foram realizadas por ele, entretanto a do Solo A foi executado por Viécili (2003). Vale ressaltar que os ensaios foram feitos de acordo com a norma vigente naquela época (1984) e estão locados conforme Figura 9. Após o ensaio, Bernardi (2006) conseguiu obter os dados da Tabela 9 e plotar a curva granulométrica apresentada representada na Figura 11.

Vale ressaltar que o Solo A e o Solo B na Figura 11 foram sobrepostos pela Amostra 2 – Faixa Superior e Amostra 2 – Faixa Inferior respectivamente, visto que as faixas da Amostra 2 foram baseadas nas amostras do Solo A e do Solo B.

Tabela 9 - Porcentagens passantes obtidas para os Solo A, Solo B, Solo C e Solo D.

Solo A		Solo B		Solo C		Solo D	
D(mm)	% Passante						
50,800	100,000	50,800	100,000	50,800	100,000	50,800	100,000
38,100	100,000	38,100	100,000	38,100	100,000	38,100	100,000
25,400	100,000	25,400	100,000	25,400	100,000	25,400	100,000
19,100	100,000	19,100	100,000	19,100	100,000	19,100	100,000
12,700	100,000	12,700	99,800	12,700	100,000	12,700	100,000
9,500	100,000	9,500	99,760	9,500	100,000	9,500	100,000
4,800	100,000	4,800	99,530	4,800	100,000	4,800	99,990
2,000	99,770	2,000	98,800	2,000	99,920	2,000	99,960
0,590	99,210	0,590	98,140	0,590	98,590	0,590	99,610
0,420	98,890	0,420	97,520	0,420	97,700	0,420	99,140
0,297	96,160	0,297	97,000	0,297	96,400	0,297	97,710
0,149	95,690	0,149	95,170	0,149	91,480	0,149	88,990
0,074	95,070	0,074	93,270	0,074	87,000	0,074	81,100
0,064	94,970	0,064	89,100	0,064	85,800	0,064	76,500
0,045	94,720	0,045	89,100	0,045	83,600	0,045	76,500
0,0320	94,480	0,0320	87,950	0,0320	83,050	0,0320	75,470
0,0220	93,740	0,0220	86,830	0,0220	82,500	0,0220	73,400
0,0160	88,820	0,0160	85,680	0,0160	80,300	0,0160	71,330
0,0120	87,390	0,0120	83,440	0,0120	75,880	0,0120	70,630
0,0080	84,930	0,0080	81,170	0,0080	73,080	0,0080	69,070
0,0060	82,470	0,0060	78,800	0,0060	71,430	0,0060	66,510
0,0040	81,040	0,0040	76,160	0,0040	68,610	0,0040	63,400
0,0030	77,180	0,0030	75,650	0,0030	65,810	0,0030	60,800
0,0020	73,660	0,0020	72,830	0,0020	63,860	0,0020	57,310
0,0010	72,380	0,0010	69,080	0,0010	58,420	0,0010	54,600

Fonte: Adaptado de Camarero (2016).

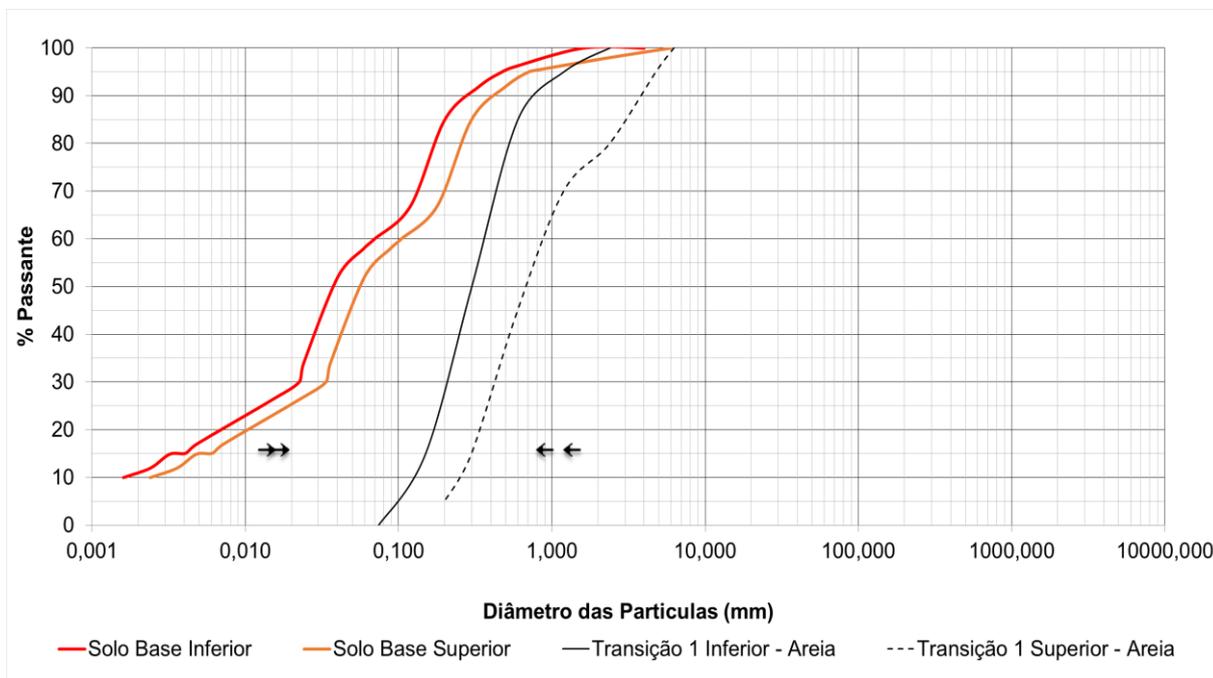
3.1.2 Critério de Terzaghi

Para a Amostra 1 aplicou-se o método de Terzaghi, apresentado no Item 2.5.1, e a partir dele plotou-se as setas no qual definem os limites impostos pelo critério no qual é possível observar a grande amplitude de material que pode ser utilizado como transição. Destaca-se que a amplitude elevada dos valores pelo método, podem levar

a escolha de materiais não adequados, uma vez que, qualquer material com granulometria dentro dos limites apresentados nas setas da Figura 12, poderia ser aceito como uma transição natural para a Amostra 1.

Com o objetivo de permitir uma comparação entre os métodos em estudo, uma vez que a faixa granulométrica especificada para a areia na ABNT NBR 7211/2022 se enquadra nos limites, foi então tomada como a base de cálculo para as demais faixas, conforme mostra a Figura 12. Destaca-se que a areia tem valor de Coeficiente de Não Uniformidade (CNU) dentro dos limites exigido pelo método ($CNU < 6$).

Figura 12 - Amostra 1 - Transição 1 pelo Critério de Terzaghi.



Fonte: Autor.

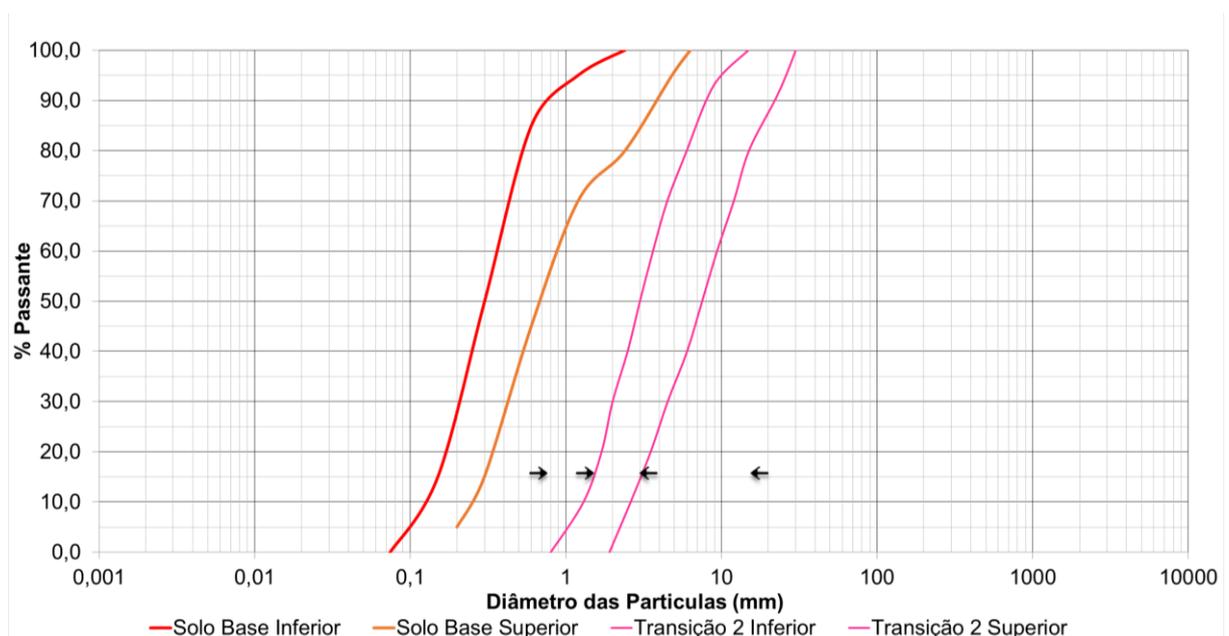
Para que fosse possível executar as conexões entre o solo base e o material mais grosseiro, foi realizado os estudos para a transição natural da areia a partir dos critérios apresentados no Item 2.5.1. Na Figura 13 é apresentado o resultado dos cálculos realizados, na qual, observa-se que o material não se enquadrava em uma das faixas da ABNT NBR 7211/2022. Deste modo, optou-se pela adoção de uma faixa denominada como Transição 2, elaborada pelo Autor, considerando os limites obtidos

e a preservação do $CNU < 6$ e com o mesmo CNU da camada de areia, conforme pode ser observado na Figura 13.

Tomado esse material como solo base, foi então repetido os passos anteriores para a determinação da transição natural deste material.

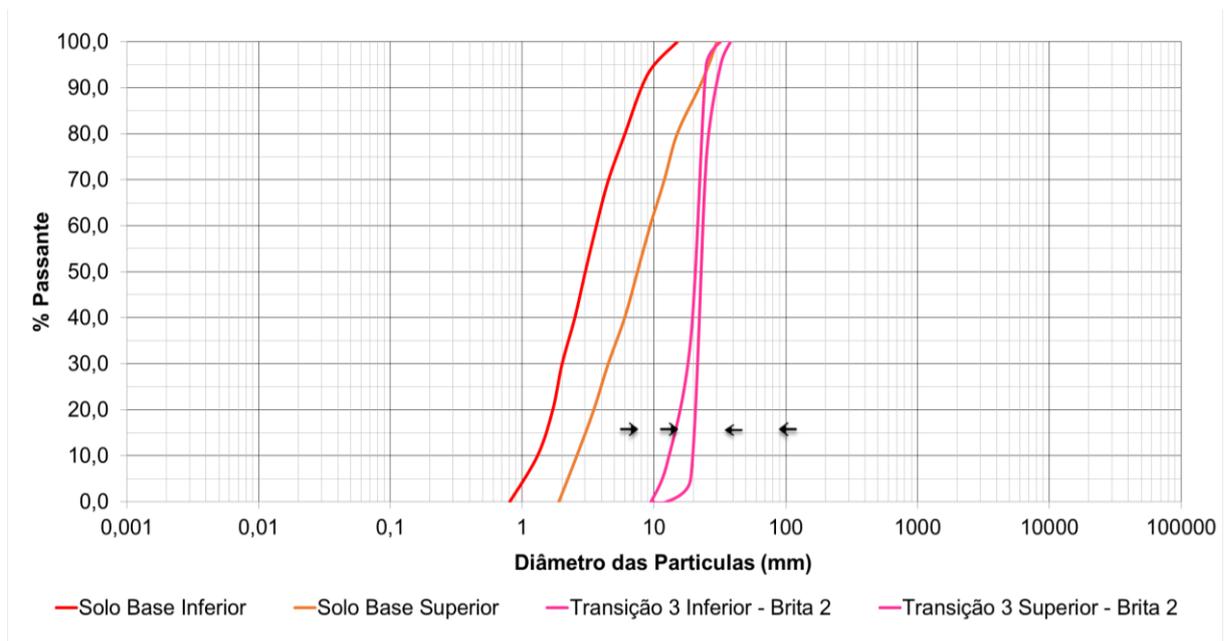
A partir dos estudos realizados, observa-se que a faixa de brita 2 apresentada na ABNT NBR 7211/2022, atende as condições estabelecidas no critério. Tal faixa é apresentada na Figura 14.

Figura 13 - Amostra 1 - Transição 2 pelo Critério de Terzaghi.



Fonte: Autor.

Figura 14 - Amostra 1 - Transição 3 pelo Critério de Terzaghi.



Fonte: Autor.

Para a Amostra 2, não foi possível realizar o dimensionamento das transições geotécnicas pelo Método de Terzaghi, uma que vez não é possível obter o D_{15} do solo base visto que essa informação é indispensável para atender os critérios de filtragem e permeabilidade, demonstrando que para o solo em questão, outros métodos de cálculo precisavam ser empregados, tais como o apresentado no Critério de Fell (2005).

3.1.3 Critério de Fell (2005)

Para o estudo de caso, retirou-se do gráfico de granulometria da Amostra 1 os valores de D_{15INF} , D_{15SUP} , D_{85INF} e D_{85SUP} do solo base, conforme apresentado na Tabela 10. Já para a Amostra 2 só foi possível obter os valores de D_{85INF} e D_{85SUP} do solo base, conforme Tabela 11.

Tabela 10 - Diâmetros retirados da faixa granulométrica da Amostra 1.

D_{15-INF}	D_{15-SUP}	D_{85-INF}	D_{85SUP}
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0,0039	0,0048	0,2	0,3

Fonte: Autor.

Tabela 11 - Diâmetros retirados da faixa granulométrica da Amostra 2.

D_{15-INF}	D_{15-SUP}	D_{85-INF}	D_{85SUP}
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
-	-	0,008	0,1

Fonte: Autor.

A partir dos dados das Tabelas Tabela 10 e Tabela 11 foram realizados os dimensionamentos das transições dos solos bases das Amostra 1 e Amostra 2, baseando-se na metodologia proposta pelo *US Soil Conservations Service*, USDA-SCS (1994) Fell, Macgregor, et al (2005), que engloba 9 passos a serem adotados no dimensionamento, que foi apresentado no Item 2.5.2.

Vale ressaltar que para se obter a curva granulométrica da areia, bem como dos possíveis agregados a serem utilizados como transição, foram obtidas a partir das faixas granulométricas estabelecidas na ABNT NBR 7211/2022. Esta norma tem como objetivo estabelecer a especificação técnica para agregados de concreto, demonstrando as faixas granulométricas para o agregado miúdo (areia) e o agregado graúdo (britas comerciais: Brita 0, 1, 2, 3 e 4), que foram tomadas para a verificação das transições.

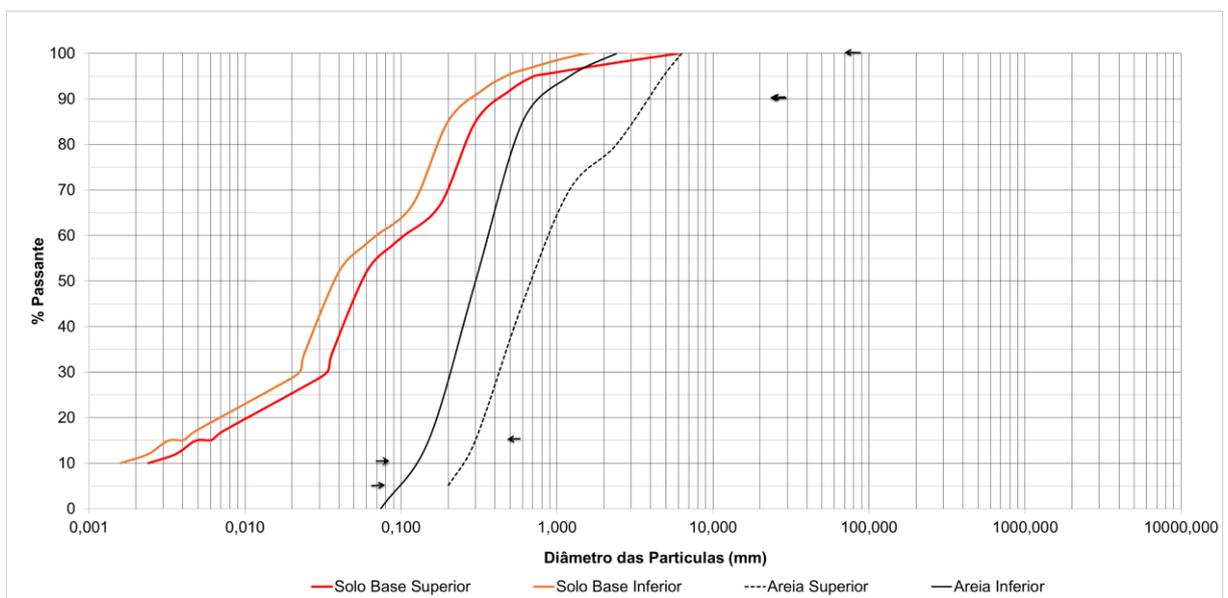
Posteriormente, retirou-se o valor de D₁₀ e D₆₀ do material de transição obtido das duas amostras, a fim de verificar o critério de CNU<6.

Devido a faixa de transição ser inferior ao material que vai ser protegido, outras camadas de transição foram determinadas, com os mesmos passos citados anteriormente, até que fosse possível obter as faixas granulométricas que permitam a aderência entre o material fino ao material mais grosseiro. Neste contexto, a faixa da areia obtida da normativa, foi considerada como a de solo base para a estrutura. Com

isso, a transição natural aplicando os passos estabelecidos por Fell, implicou na utilização da brita 0, como material de transição. Optou-se ainda, pela determinação de uma terceira faixa de material (possivelmente um núcleo drenante de um tapete drenante), tomando a brita 0 como solo base. A partir dos cálculos, observa-se que a brita 3 é a transição natural para o material.

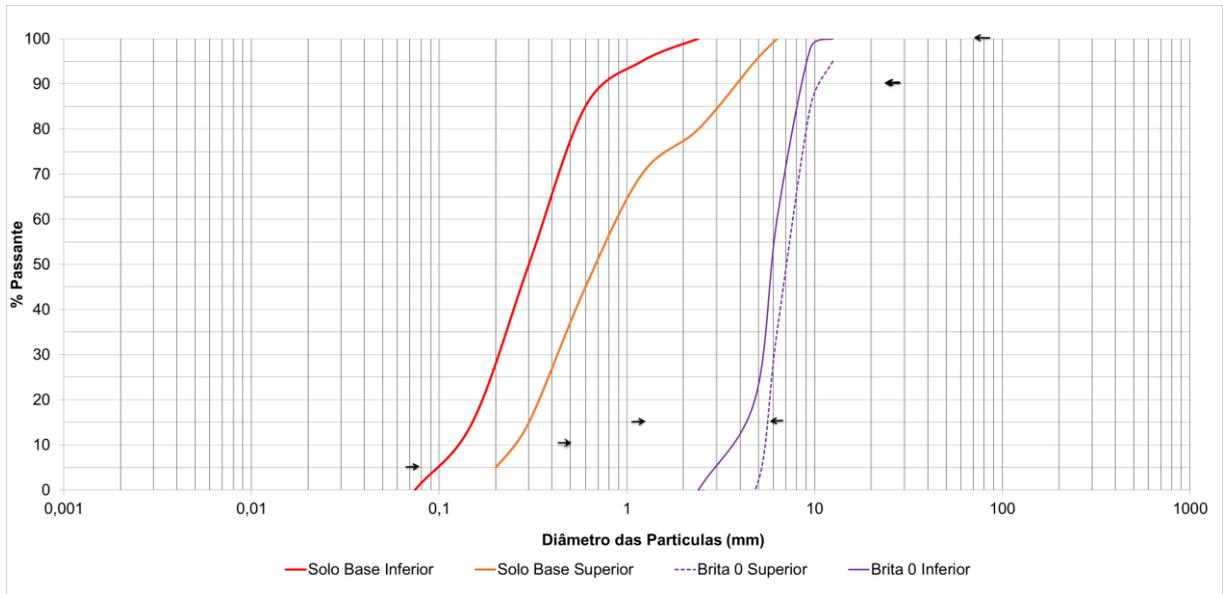
As faixas dimensionadas foram apresentadas entre as Figura 15 a Figura 17, apresentam as faixas determinadas para a Amostra 1. Nelas constam as faixas granulométricas do solo base, juntamente com a sua respectiva faixa de transição que irá realizar a proteção do solo base que é delimitado por setas posicionadas conforme proposto no item 2.5.2.

Figura 15 - Amostra 1 - Transição 1 pelo Critério de Fell.



Fonte: Autor.

Figura 16 - Amostra 1 - Transição 2 pelo Critério de Fell.



Fonte: Autor.

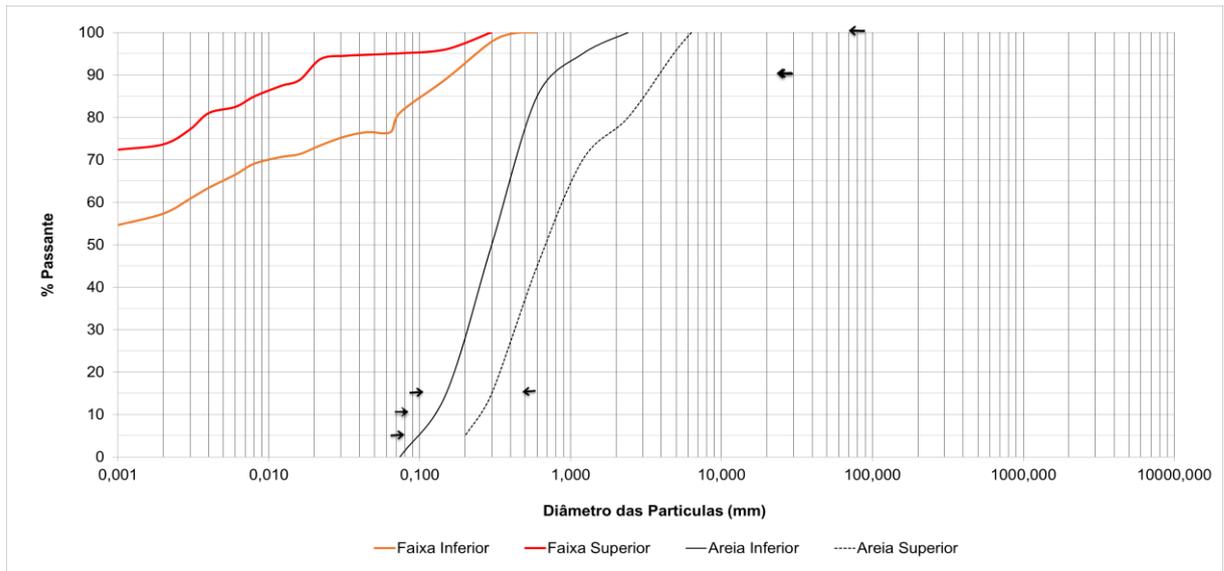
Figura 17 - Amostra 1 - Transição 3 pelo Critério de Fell.



Fonte: Autor.

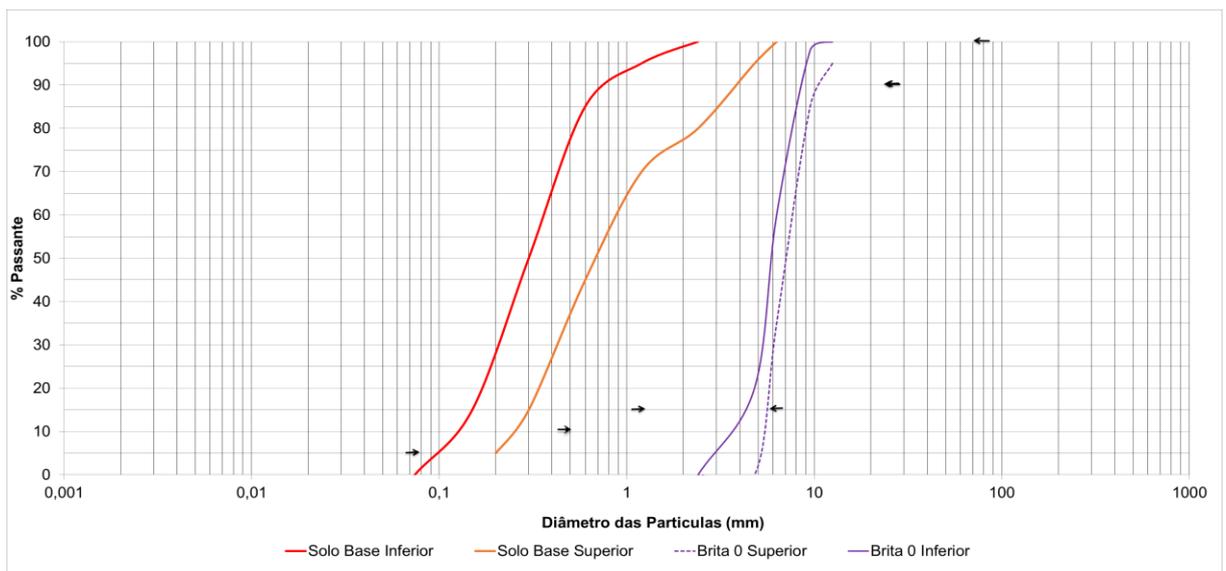
Destaca-se que a partir dos cálculos realizados, as transições a serem empregadas a partir do material do aterro, seriam formadas por areia, brita 0 e brita 3, considerando as faixas apresentadas na ABNT NBR 7211/2022. Para a Amostra 2, são apresentados os resultados dos cálculos, conforme a Figura 18 a Figura 20

Figura 18 - Amostra 2 - Transição 1 pelo Critério de Fell.



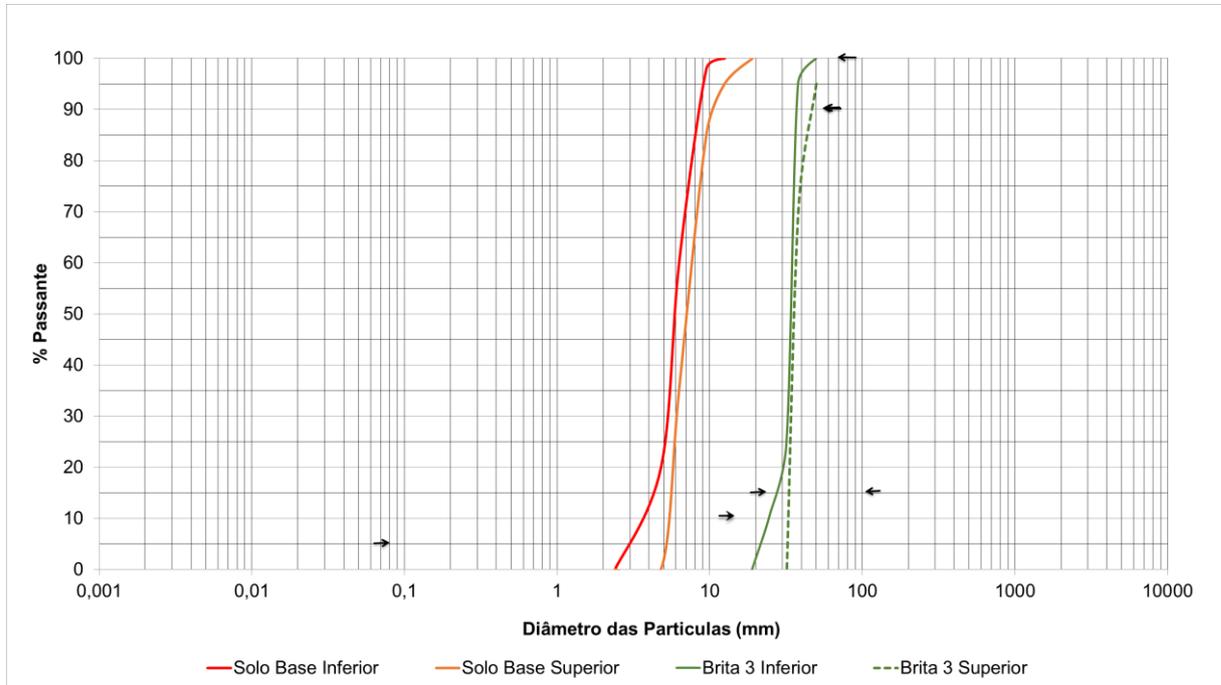
Fonte: Autor.

Figura 19 - Amostra 2 - Transição 2 pelo Critério de Fell.



Fonte: Autor.

Figura 20 - Amostra 2 - Transição 3 pelo Critério de Fell



Fonte: Autor.

Baseado nos estudos realizados pela Amostra 2, as transições geotécnicas para os materiais, contemplam a adoção de areia, brita 0 e brita 3, considerando as diretrizes da ABNT NBR 7211/2022.

4 RESULTADOS

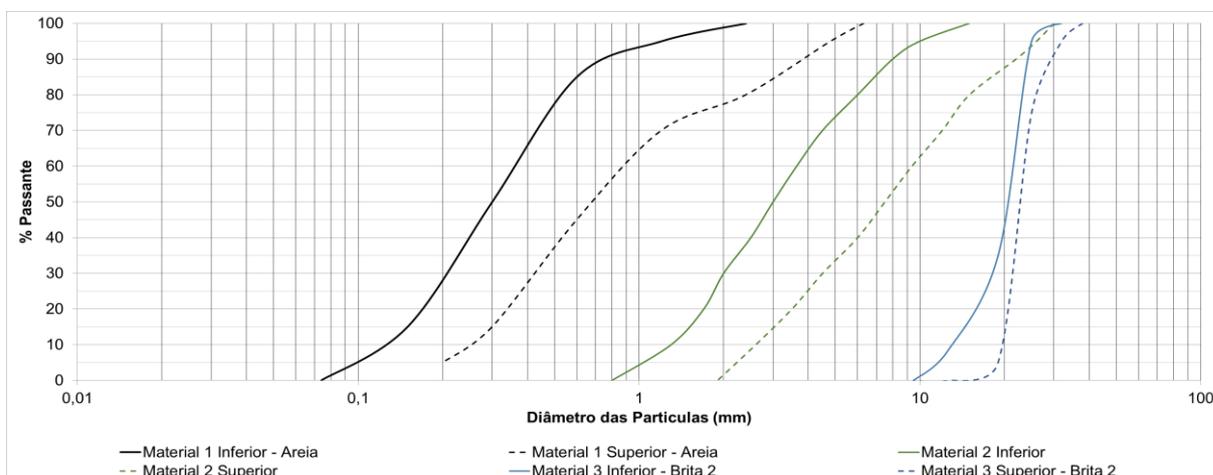
4.1 Critério de Terzaghi

Para a Amostra 1 a partir do método de dimensionamento de Terzaghi foi possível obter as 3 camadas de transições geotécnicas. Os níveis de controle estabelecidos para a faixa de Transição 1 tiveram uma grande amplitude, uma vez que os limites pelos critérios de filtragem e permeabilidade, encontram-se com amplitude de faixa elevado, o que dificultaria a definição precisa de uma faixa de material. Neste contexto, uma vez que a faixa da areia estabelecida na ABNT NBR 7211/2022 ficou dentro dos limites estabelecidos. A faixa da Transição 2 foi elaborada com base no CNU da Transição 1 pois o material obtido nos limites não é vendido comercialmente. Já a Transição 3 foi possível utilizar a Brita 2 como a última camada de transição geotécnica. Além do mais, o CNU de todos os materiais atendeu o critério exigido pelo método de $CNU < 6$.

Na Figura 21 é possível verificar todas as camadas resultantes desse método e na Tabela 12 as porcentagens passantes com seus respectivos diâmetros.

Com isso, foi possível obter duas faixas granulométricas com materiais encontrados comercialmente areia e brita 2 e um material que não é comercial. Com isso pode ser uma dificuldade para o executor do projeto garantir que as granulometrias empregadas sejam as adequadas.

Figura 21 - Faixas de todos os materiais de transição da Amostras 1 pelo critério de Terzaghi.



Fonte: Autor.

Tabela 12 - Porcentagem passante dos materiais de transição da Amostra 1 pelo critério de Terzaghi.

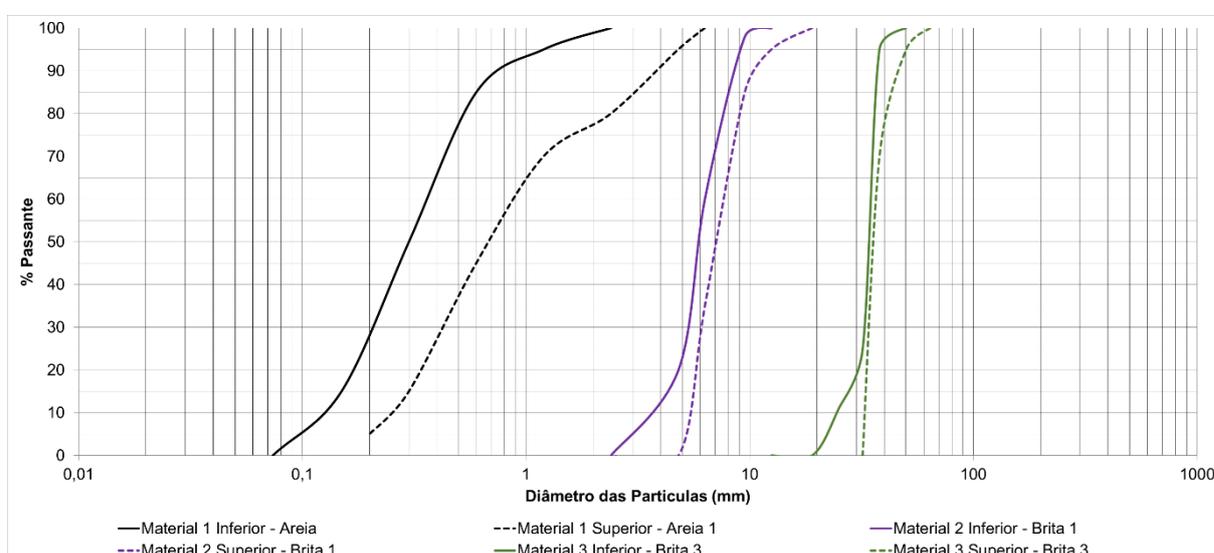
Material	Areia		Transição 2		Brita 2	
	mm		mm		mm	
% Passante	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior
100	2,4	6,3	15,0	30,0	32,0	38,0
90	0,8	3,8	8,0	22,0	24,0	29,0
80	0,5	2,4	6,0	15,0	23,0	26,0
70	0,4	1,2	4,5	12,0	23,0	24,0
60	0,4	0,9	3,6	9,4	21,0	23,0
50	0,3	0,7	3,0	7,5	21,0	23,0
40	0,3	0,5	2,5	6,0	20,0	22,0
30	0,2	0,4	2,0	4,5	18,0	21,0
20	0,2	0,3	1,7	3,5	16,0	21,0
15	0,0	0,3	1,6	2,8	14,0	20,0
10	0,1	0,3	1,3	2,6	13,0	20,0
CNU	2,7	3,5	2,8	3,6	1,6	1,2

Fonte: Autor.

4.2 Critério de Fell (2005)

Durante a realização do estudo do Critério de Fell nota-se que tanto para a Amostra 1 quanto para a Amostra 2 foi possível obter para as camadas de transições geotécnicas materiais comerciais conforme granulometrias apresentadas na ABNT NBR 7211:2022, sendo elas a Areia, a Brita 1 e a Brita 3 conforme apresentada na Figura 22 e nas porcentagens passantes na Tabela 13.

Figura 22 - Faixas de todos os materiais de transição das Amostras 1 e 2 pelo critério de Fell (2005).



Fonte: Autor.

Tabela 13 - Porcentagem passante dos materiais de transição das Amostras 1 e 2 pelo critério de Fell (2005).

Material	Areia		Brita 0		Brita 3	
	mm		mm		mm	
% Passante	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior
100	2,4	6,3	12,5	19,0	50,0	64,0
90	0,8	3,8	8,2	10,1	37,0	47,0
80	0,5	2,4	7,8	9,0	35,0	40,0
70	0,4	1,2	7,0	8,1	35,0	38,0
60	0,4	0,9	6,3	7,7	34,0	37,0
50	0,3	0,7	6,0	7,0	34,0	36,0

Material	Areia		Brita 0		Brita 3	
	mm		mm		mm	
	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior
40	0,3	0,5	5,5	6,7	33,0	35,0
30	0,2	0,4	5,3	6,0	33,0	35,0
20	0,2	0,3	4,8	5,8	30,0	34,0
15	0,2	0,3	4,3	5,5	28,0	33,0
10	0,1	0,3	3,7	5,4	24,0	32,0
CNU	2,7	3,5	1,7	1,4	1,4	1,2

Fonte: Autor.

Vale ressaltar que é imprescindível que os materiais de transição estejam dentro dos limites impostos pelos dois métodos. Pois ao colocar um material mais grosso que a faixa superior os materiais adotados não garantiriam os critérios de filtragem e permeabilidade estabelecidos, o que implicaria de arraste de materiais finos para o interior do dreno (elemento de condução dos fluxos).

Entretanto se for usado um material mais fino que a faixa inferior, poderia ou não haver problemas operacionais com o dreno sendo necessário a verificação dos critérios de permeabilidade e infiltração. Porém, essa transição seriam faixas antieconômicas em termos construtivas, pois é estabelecido dentro da engenharia o critério que atende a passagem dos fluxos de maneira ideal e dentro do que se considera econômico.

5 CONCLUSÃO

A drenagem interna juntamente com elaboração geral do projeto e um arranjo e dimensionamento adequado é de extrema importância para a operação de barragens de terra, uma vez que a não utilização desse sistema pode acarretar a elevação de poropressões e *piping*.

Neste trabalho, foi possível obter as faixas granulométricas de transição geotécnica da Amostra 1 para o Critério de Fell (2005) e para o Critério de Terzaghi, entretanto para a Amostra 2 só foi possível analisar o solo base pelo Critério de Fell (2005). Visto que, para o critério de Terzaghi a amostra precisa ter porcentagem passante do D_{15} , o que não ocorreu nesse caso.

Vale ressaltar que apesar dos dois métodos terem os mesmos objetivos de cumprir as condições de permeabilidade e filtragem não houve uma convergência entre os dimensionamentos uma vez que para a mesma amostra foram obtidos diferentes materiais de transição.

No método de Terzaghi aplicado na Amostra 1, foi possível observar a grande amplitude resultante dos limites obtidos. Com isso, existe uma grande variabilidade de material que pode ser utilizado, fazendo com que exista a possibilidade de segregação do material e inúmeras possibilidades de materiais que podem ser adotados, no qual cada profissional que fosse realizar este dimensionamento poderia obter resultados diferentes.

Salienta-se, que o critério de Fell (2005) fornece limites inferiores e superiores para a determinação da faixa, dessa forma restringe o material trazendo um valor mais próximo do que seria o ideal.

Terzaghi foi precursor na análise do comportamento das transições geotécnicas, a partir dele outros métodos foram elaborados a fim de refiná-lo, pois em materiais mais finos ou bem graduados há uma dificuldade de dimensionar utilizando esse método. Com isso os demais critérios têm como objetivo deixar menos empírico a definição da faixa de material definida pelo método de Terzaghi.

Devido ao Critério de Fell (2005) apresentar limites superiores restringindo mais a faixa ele é considerado mais conservador. Além do mais, o fato dele poder ser aplicado tanto para a Amostra 1 e 2 reafirma que é mais efetivo a utilização do critério de Fell (2005) nesses casos.

Esse estudo demonstra que existem diferentes formas de dimensionar transições geotécnicas de filtro de barragem e reafirma a importância de se realizar um projeto adequado. Portanto confirma-se a necessidade de se ter pesquisas para atestar a potencialidade e aplicabilidade de diferentes métodos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Comparar os métodos estudados com outros existentes para as Amostras 1 e 2;
- Utilizar o Critério de Terzaghi e Fell para amostras de outras localidades, como por exemplo no estado de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Solo - Análise granulométrica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1984.

ABNT. **NBR 13029 - Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2017.

ABNT. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2022.

ANA. **Guia Prático de Pequenas Barragens**. Agência Nacional das Águas. Brasília. 2016.

ANA. **Relatório de Segurança de Barragens**. Agência Nacional das Águas. [S.I.]. 2022.

ANA. **Definições Importantes sobre Segurança de Barragens**. Agência Nacional das Águas. [S.I.]. s.d.

ANDERSON, Scott; FERGUSON, Keith. **Examination of three-dimensional effects of internal erosion (IE) and piping processes in soil**. Denver, p. 3-10. 2015.

ANM. **Report Trimestral Descaracterização de Barragens a Montante**. Agência Nacional de Mineração. Brasília, p. 3-22. 2022.

ARAUJO, 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.

ARAUJO, Cecília B. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, p. 133. 2006.

ASSIS, A.; ESPÓSITO, T. **Construção de Barragens de Rejeito Sob uma Visão Geotécnica**. III Simpósio Sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos – REGEO. Araçatuba, p. 3-15. 1995.

BERNARDI, Juarez. **Caracterização de Jazidas de Solo Residual de Basalto Visando seu Emprego em Barragens de Terra**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, p. 64-159. 2006.

BIEDERMANN, R. **Safety concept for dams: development of the swiss concept since 1980**. Berne, Switzerland. 1997.

BIRCK, Mateus. **Barragem de terra homogênea: uma análise crítica entre os projetos empírico e científico**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 74. 2016.

CAMARERO, Pedro L. **Análise da integridade física de barragens de terra a partir do método geofísico da eletrorresistividade com ensaios geotécnicos**. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro/SP, p. 19-99. 2016.

CAVALHEIRO, Fernando N. **Metodologia para investigação de colmatção de filtros de barragem de terra – ESTUDO PILOTO**. Universidade Tecnológica do Paraná. Paraná, p. 16. 2018.

CORDEIRO, Bruno T. **Análise de Estabilidade e Percolação em Barragens de Terra: Estudo de Caso em um Dique de Terra Homogênea**. Universidade de Santa Catarina. Florianópolis, p. 175. 2021.

CRUZ, Paulo T. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto**. 2. ed.

ECHEVRRI, Julieta. **Aplicabilidade dos Rejeitos de Mineração de Ferro para Utilização em Filtros de Barragens**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 7-15. 2012.

ESPÓSITO, Terezinha J. **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico**. Universidade de Brasília. Brasília. 2000.

ESTEVES, F. P. **Barragens de Terra**. Universidade da Paraíba. Escola Politécnica de Campina Grande. Campina Grande. 1964.

FELL, R. et al. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. [S.l.]: [s.n.], v. 129, 2003. p. 307-314.

FELL, Robin et al. Geotechnical Engineering of Dams. 2. ed. London: CRC Press, 2005.

FEMA. **Filters for embankment dams: Best practices for design and construction**. U.S. Department of Homeland Security. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. 2011.

FIDELES, Bruna T. M.; MALVEIRA, Vanda T. C. **Segurança nas barragens Gangorra e Itaúna contra erosão interna**. Revista Tecnologia. Fortaleza, p. 5-8. 2018.

FIORINI, Ademar S. **Mini curso: Segurança de barragens**. VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. [S.l.]. 2008.

FOSTER, Mark. **The probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping**. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales. Sydney. 1999.

FOSTER, Mark; FELL, Robin. **Assessing embankment dam filters which do not satisfy design criteria**. UNICIV Report No. R-376, ISBN 85841 343 4, ISSN 0077-880X, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales. Sydney. 1999.

FOSTER, Mark; FELL, Robin; SPANNAGLE, Matt. The statistics of embankment dam failures and accidents. **Canadian Geotechnical Journal**, 2000.

FUSARO, Teresa C. **Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2007.

GOMES, Francisco H. D. S. **Quantificação de Risco de Piping em Barragens de Terra Via Abordagens Probabilística e Fuzzy**. Universidade Federal do Ceará. Ceará, p. 34-42. 2019.

GUIDICINI, Guido; SANDRONI, Sandro S.; MELLO, Flavio M. D. **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil [livro eletrônico]**. Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro. 2021.

GUIMARÃES, Carlos J. D. P. **Aspectos da Drenagem de Barragens de Rejeito com Alçamento a montante: caso da Barragem I, da Mina de Córrego do Feijão em Brumadinho - MG**. Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2021.

HUNTER, R. P. **Development of transparent soil testing using planar laser induced fluorescence in the study of internal erosion of filters in embankment dams**. Master of Science in Engineering Geology, University of Canterbury. Nova Zelândia. 2012.

IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração**. Instituto Brasileiro de Mineração. Brasília, p. 11-128. 2016.

IBRAM. Exportação de minérios foi crucial para manter saldo da balança comercial positivo em 2021. **Instituto Brasileiro de Mineração**, 2022. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/exportacao-minerios-saldo-balancacomercial-positivo-2021/>>. Acesso em: 15 dez. 2022.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations**. [S.l.]. 2016.

ICOLD. **International Commission on Large Dams – Lessons from dam incidents - Orós Dam**. [S.l.]. 1974.

ICOLD. **Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations - Volume 1: Internal erosion processes and engineering assessment**. Bulletin 120. 2013.

KLOHN, E. J. **The development of current tailing dam design and construction methods**. In: WILSON, D. (Ed.). Colorado School of Mines. Colorado. 1981.

KOVÁCS, G. **Developments in water science**. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. 1981.

LADEIRA, Josias E. R. **Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos [manuscrito] : o caso UHE-São Simão**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 24-30. 2007.

LEITE, Sérgio R. **Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy**. Universidade de Brasília. Brasília. 2019.

LOCKE, M. R. **Analytical and laboratory modelling of granular filters for embankment dams**. University of Wollongong. Wollongong. 2001.

MASSAD, Façal. **Obras de Terra**. 2°. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MEIRELLES, Fernando S. C. **Curso Segurança de Barragens**. ANA-Agência Nacional das Águas. [S.l.]. s.d.

MONTEIRO, Carlo R. L. **Construção de modelos físicos de barragens de terra para aula prática**. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife-PE. 2019.

PIMENTA FILHO, M. A. **Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.

PIMENTA FILHO, Marcos de Ávila. **Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.

QUINTAS, Fernando E. G. **Planejamento da Construção de Barragens de Terra**. Engenharia da Universidade do Porto. [S.l.]. 2002.

RAUT, Ashok; INDRARATNA, Buddhima. **Further advancement in filtration criteria through constriction-based techniques**. ASCE. [S.l.]. 2008.

ROSA, A.A.C.; HENDERSON, R.C; ANDERS, C.E. **CONSTRUÇÃO DE DRENOS E TRANSIÇÕES** –. Simpósio Sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná. Paraná. 1983.

SHERARD, James L.; DUNNIGAN, Lorn P. **Filters and leakage control, in embankment dams, in Seepage and Leakage from Dams and Impoundments.** ASCE Geotechnical Engineering Division Conference. 1985.

SHERARD, James L.; DUNNIGAN, Lorn P. **Critical filters for impervious soils.** J. Geotech. Eng. ASCE.

SILVA, Dayana S. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens.** Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2016.

SNISB. Consultar Barragem. **SNISB**, 2022. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/consultar-barragem>>. Acesso em: 05 fev. 2022.

SNISB. Perguntas Frequentes. **SNISB**, 2022. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/perguntas-frequentes#:~:text=A%20Categoria%20de%20Risco%20%2D%20CRI,atendimento%20ao%20Plano%20de%20Seguran%C3%A7a.>>. Acesso em: 5 Fevereiro 2022.

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.

USB. **Embankment Dam Instrumentation Manual.** US Bureau of Reclamation, Denver. 1987.

USDA-SCS. **Gradation design of sand and gravel filters.** United States Department o Agriculture, Soil Conservation Service. National Engineering Handbook. 1994.

VIECILI, Cristiano. **Determinação dos parâmetros de resistência do solo de Ijuí a partir do ensaio de cisalhamento direto.** Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí. 2003.

ZUCHERATTO JÚNIOR, Nelson. **Revisão bibliográfica sobre segurança em barragens de terra por meio de instrumentação geotécnica.** Ouro Preto. 2021.