



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO CAMPUS CARAÚBAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GIOVANINNY GEORGE DUARTE DE LIMA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS EM ALTERNATIVA AO USO DA ARGILA COMO
NÚCLEO DE BARRAGENS DE TERRA**

CARAÚBAS - RN

2016

GIOVANINNY GEORGE DUARTE DE LIMA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS EM ALTERNATIVA AO USO DA ARGILA COMO
NÚCLEO DE BARRAGENS DE TERRA**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA),
como exigência final para obtenção do título
de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Wellington Lorrان Gaia
Ferreira - UFERSA

CARAÚBAS - RN

2016

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

L732a Lima, Giovaninny George Duarte de.

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO
USO DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM ALTERNATIVA AO USO
DA ARGILA COMO NÚCLEO DE BARRAGENS DE TERRA /
Giovaninny George Duarte de Lima. - 2016.
65 f.: il.

Orientador: Wellington Lorran Gaia Ferreira. Monografia
(graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2016.

1. Barragens de terra. 2. Misturas asfálticas.
3. Permeabilidade. 4. Vazão. I. Ferreira,
Wellington Lorran Gaia, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

DEPARTAMENTO CAMPUS CARAÚBAS

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS EM ALTERNATIVA AO USO DA ARGILA COMO
NÚCLEO DE BARRAGENS DE TERRA**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA),
como exigência final para obtenção do título
de Engenheiro Civil.

APROVADO EM 10 / 11 / 2016

BANCA EXAMINADORA


Prof. Me. Wellington Lorrان Gaia Ferreira – UFERSA
Orientador – Presidente


Prof. Me. Desireé Alves de Oliveira - UFERSA
Primeiro Membro


Prof. Me. Gilvan Bezerra dos Santos Júnior – UFERSA
Segundo Membro

A Maria Nizete e Francisco Cândido, pessoas das quais minha alegria é compartilhada todos os dias. Me falta palavras para descrever o quanto devo a vocês pelo meu caráter. Pessoas que possuem uma imensa força de vontade, que são guerreiros, honestos, e além de tudo, nunca mediram seus esforços para me oferecer tudo que há de melhor. Souberam ser pais e avós ao mesmo tempo, souberam educar, passar-me qualidades não só válidas para minha formação acadêmica, mas também para minha formação humana.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao meu bom Deus, toda a honra e toda a glória.

Aos meus pais Edilma e Giovan, que mesmo em momento difíceis e complicados estiveram sempre ao meu lado.

Aos meus avós que nunca deixaram de me dá as mãos. Que sempre foram minhas bases e serviram de inspiração para o meu caráter.

Aos meus irmãos Geane, Gian, Jordânia e Gidean, que me trouxeram muitos sorrisos e compartilharam muitas das minhas alegrias. Um “eu amo vocês” é muito pouco para expressar o que representam para mim.

Ao meu sobrinho Renan, que mostra em sua curiosidade uma inteligência incrível.

A todos os meus familiares, que sempre estavam por perto, dedicando um pouco de seu tempo a mim.

Ao meu orientador Wellington Lorrán pelo incentivo, cobrança, colaboração e paciência durante esse trabalho.

A minha namorada Keuri Fernandes, por ter se tornado tão importante para mim durante essa caminhada, por não me deixar pensar em desistir, por me incentivar e apoiar mesmo em situações tão complicadas.

A todo o corpo docente do curso de Engenharia Civil da Ufersa-Caraúbas, por se fazerem presentes nem só na academia, mas também na vida pessoal.

Aos meus irmãos que ganhei dentro da universidade Zilton, Hugo, Ronyellison, Diogo, Thiago, Luís Fernando, Lucas, Layon, Daniela, Kerolaynny, Domilene, Cristina e Jéssica. Podem ter certeza, levarei em minha mente todas aquelas conversas, brincadeiras, brigas, noites e mais noites de estudo que tivemos.

Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão e nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

Avaliar a utilização de Misturas Asfálticas (MA) em alternativa à argila como núcleo de barragens de terra é de fundamental importância para a engenharia civil, pois o mercado da mesma se encontra em um processo de inovação e desenvolvimento, gerando novas pesquisas e novas soluções aos problemas. Com isso, é importante que se encontre soluções economicamente viáveis e tecnicamente aceitáveis. As barragens são estruturas construídas transversalmente ao curso d'água, e tem por objetivo, armazenar ou reter a mesma para o uso em geração de energia elétrica, abastecimento, irrigação e entre outros. O presente trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade técnica e econômica do uso de MA como núcleo de barragens de terra em substituição à argila (material comumente utilizado em núcleo de barragens). Através de simulações numéricas de fluxo d'água em uma seção hipotética de barragem de terra, foi estudado o comportamento da vazão no núcleo da barragem para os dois casos analisados: (i) núcleo composto por argila e (ii) núcleo composto por MA. Os valores de permeabilidade utilizados como dados de entrada na análise de fluxo foram obtidos a partir de estudos na literatura. Alguns parâmetros, como o valor da permeabilidade e a largura da base do núcleo da barragem foram alterados a fim de verificar a influência desses fatores nos valores de vazão. Assim, após realizadas essas simulações, foi possível montar uma equação que relaciona a largura da base do núcleo com argila equivalente a espessura de um núcleo com MA. Feito isso, determinou-se o volume de material necessário para a argila e para as MA, de modo que ambos os materiais oferecessem a mesma propriedade (vazão) para a estrutura. Por meio de pesquisas no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), calculou-se os custos para cada material, podendo assim realizar um comparativo entre os mesmos. No geral, observou-se que, o custo de um núcleo com argila é bem mais elevado do que um com MA. Portanto, verificou-se que, além de atender as mesmas propriedades das argilas, as MA se apresentam como uma solução economicamente viável ao problema, e ainda, tecnicamente eficiente.

Palavras-chave: Barragens de terra. Misturas asfálticas. Permeabilidade. Vazão.

ABSTRACT

Assessing the use of asphalt mixtures (AM) as an alternative to clay as a core of earth dams is of fundamental importance for civil engineering, as the market is in a process of innovation and development, generating new research and new solutions to problems. It is therefore important to find economically viable and technically acceptable solutions. Dams are structures built transversely to the watercourse, and are intended to store or retain the same for use in power generation, supply, irrigation and among others. The present work aims at verifying the technical and economical feasibility of the use of AM as a core of earth dams instead of clay (commonly used material in the dam nucleus). Through numerical simulations of water flow in a hypothetical section of earth dam, the flow behavior in the dam core was studied for the two analyzed cases: (i) core composed of clay and (ii) core composed of AM. The permeability values used as input data in the flow analysis were obtained from studies in the literature. Some parameters, such as the permeability value and the width of the dam core base, were altered in order to verify the influence of these factors on the flow values. Thus, after performing these simulations, it was possible to construct an equation that relates the width of the core base with clay equivalent to the thickness of a core with AM. This determined the volume of material required for the clay and the AM so that both materials offered the same property (flow) for the structure. By means of researches in the National System of Research of Costs and Indices of the Civil Construction (SINAPI), the costs for each material were calculated, thus being able to make a comparative among them. In general, it has been observed that the cost of a core with clay is much higher than one with AM. Therefore, it has been verified that, in addition to meeting the same properties of the clays, the AM presents itself as an economically feasible solution to the problem, and yet, technically efficient.

Keywords: Earth Dams. Asphalt Mixtures. Permeability. Flow Rate.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados encontrados por Oliveira (2003) para determinação da permeabilidade horizontal e vertical.	27
Tabela 2: Valores dos coeficientes de permeabilidade (k) para solos.	28
Tabela 3: Valores dos coeficientes de permeabilidade (k) para misturas asfálticas.	29
Tabela 4: Classificação de misturas asfálticas em termos de sua permeabilidade (adaptado de O'FLAHERTY, 2002).	29
Tabela 5: Informações de barragens localizadas no Nordeste.	41
Tabela 6: Permeabilidade dos materiais utilizados.	43
Tabela 7: Custo das argilas por estado (R\$)	49
Tabela 8: Custo das misturas asfálticas por estado (R\$)	50
Tabela 9: Custo médio para o nordeste (R\$)	50
Tabela 10 - Vazão (Q em m ³ /s) para combinações de largura (B em m) de base do núcleo e k (m/s).	51
Tabela 11 - Coeficiente Angular α para cada valor de B (m).	54
Tabela 12 - Validação da Equação 19 gerada pelas simulações.	56
Tabela 13 - Vazão (Q em m ³ /s) para combinações de espessura (e em m) de base do núcleo e coeficiente de permeabilidade (k em m/s)	57
Tabela 14 - Percentual de diminuição da vazão com o aumento da espessura e para as três MA analisadas	57
Tabela 15 - Dimensões de base de núcleo (B) para cada espessura de MA (e) de igual vazão.	58
Tabela 16 - Custos de MA e Argila para uma mesma vazão	59
Tabela 17 - Custos de cada MA e da argila para uma mesma vazão	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Barragens	17
Figura 2 - Perfil de uma barragem e seus elementos	18
Figura 3 - Ilustração para conceito de cargas hidráulicas.....	20
Figura 4 - Ilustração da atuação das forças de percolação e gravitacional em um corpo de prova	22
Figura 5 - Modelo para análise de um permeâmetro de carga constante	25
Figura 6 - Modelo para análise de um permeâmetro de carga variável.....	25
Figura 7 - Exemplos de fluxo tridimensional e bidimensional.....	31
Figura 8 - Rede de fluxo em uma barragem de seção homogênea	33
Figura 9 - Ilustração do modelo de elementos finitos gerados pelo Slide 6.0.....	34
Figura 10 - Ilustração da etapa executada no Slide Model.....	36
Figura 11 - Ilustração da etapa Slide Compute.....	38
Figura 12 - Ilustração do procedimento para o Slide Interpret.....	39
Figura 13 - Dimensões buscadas no DNOCS e na literatura.....	40
Figura 14 - Condições de contorno para a seção hipotética	44
Figura 15 - Fluxograma das atividades realizadas no trabalho	45
Figura 16 - Geometria analisada para uma base de 50m	45
Figura 17 - Cálculo de vazões no centro do perfil da barragem.....	47
Figura 18 - Geometria analisada para uma espessura (e) de mistura asfáltica de 3,00 m	48
Figura 19 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 25m	52
Figura 20 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 30m	52
Figura 21 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 35m	52
Figura 22 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 40m	53
Figura 23 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 45m	53
Figura 24 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 50m	53
Figura 25 - Relações de base de solo (B) e coeficientes angulares (α)	55
Figura 26 - Relação de Custo vs Vazão para argila e MA – CA Granito.....	60
Figura 27 - Relação de Custo vs Vazão para argila e MA – CA Calcário	61
Figura 28 - Relação de Custo vs Vazão para argila e MA – CA Micaxisto.....	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 BARRAGENS DE TERRA	15
3.1.1 Componentes de uma Barragem de Terra	17
3.2 ESTUDO DA ÁGUA NO SOLO	18
3.2.1 Cargas Hidráulicas	19
3.2.2 Força de Percolação	21
3.3 PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS	22
3.3.1 A Lei de Darcy	23
3.3.2 Tipos de Ensaio para se Determinar o Coeficiente de Permeabilidade (k)	24
3.3.3 Fatores que influenciam no valor de k	26
3.3.4 Permeabilidade dos solos e das misturas asfálticas	28
3.4 PERCOLAÇÃO DA ÁGUA	29
3.4.1 Fluxo de água através de meios porosos ou Teoria da Percolação	30
3.4.2 Redes de Fluxo e Métodos para sua Determinação	33
4. METODOLOGIA	35
4.1 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE SLIDE 6.0	35
4.2 GEOMETRIA DA SEÇÃO HIPOTÉTICA	40
4.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS	42
4.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA A ANÁLISE	43
4.5 SIMULAÇÕES DE FLUXO	44
4.5.1 Simulação para uma Barragem com Núcleo de Solo (argila)	46
4.5.2 Simulação para uma Barragem com Núcleo de Misturas Asfálticas (Concreto Asfáltico)	48
4.6 CUSTOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1 RESULTADOS PARA O NÚCLEO DE SOLO (ARGILA)	51
5.2 RESULTADOS PARA O NÚCLEO DE MISTURAS ASFÁLTICAS (CONCRETO ASFÁLTICO)	57
5.3 RESULTADOS PARA OS CUSTOS DOS MATERIAIS	58
6. CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1. INTRODUÇÃO

A construção civil passa constantemente por um processo de inovação, com o passar do tempo outras tecnologias e novas ideias se apresentam como solução de problemas antigos e até mesmo de problemas atuais. Nesse contexto, uma das obras de engenharia mais importantes do ponto de vista social e econômico, trata-se de barragens. Essas estruturas são construídas com a finalidade de armazenar recursos hídricos, gerar energia elétrica, abastecimento de água, irrigação, controle de cheias, navegação, recreio e entre outras atividades. De acordo com Chiossi (2013), uma barragem pode ser definida como elemento estrutural construído transversalmente a direção do curso d'água responsável por impedir a passagem da mesma e, posteriormente, a criação de um reservatório artificial. Além disso, existem dois grupos de barragens bem definidos, quando relacionadas aos seus objetivos, as de regularização que possuem a finalidade de controlar o regime hidrológico de um rio, e as de retenção, que tem o objetivo de reter grandes volumes d'água, mais comum em regiões de longas secas (COSTA, 2012).

Para a construção das barragens, os materiais comumente utilizados são solos, britas e concreto. A escolha do tipo de material que será utilizado é função do tipo de fundação e do solo encontrado no local de implantação da obra, bem como da disponibilidade dos materiais encontrados na região. Dentre os componentes de uma barragem, o núcleo é fundamental para manter a estanqueidade da estrutura. Os materiais geralmente utilizados para execução desse elemento de uma barragem de terra devem apresentar um baixo valor de Coeficiente de Permeabilidade (k). Segundo Caputo (1988), o valor do k é uma forma de quantificar a propriedade que um determinado material tem de permitir a passagem de água pelos seus vazios. As areias apresentam valores de k com uma ordem de grandeza variando de 10^{-7} a 10^{-3} m/s, os siltes entre 10^{-9} e 10^{-6} m/s e as argilas surgem com valores menores do que 10^{-9} m/s (PINTO, 2006). Nestas circunstâncias, quando comparadas a outros tipos de solos, as argilas são as mais usadas como núcleo de barragens, pois possuem características (permeabilidade e coesão) necessárias e satisfatórias para realizar essa função (estanqueidade da barragem).

Entretanto, uma das principais dificuldades para a construção do núcleo de barragens é a ausência de argila suficiente nas proximidades da área onde será realizada a obra. Dessa forma, materiais alternativos, como o concreto e as misturas asfálticas vêm se tornando alternativa ao uso da argila. As misturas asfálticas são compostas pela união de agregados naturais ou artificiais e ligantes asfálticos (produto derivado do petróleo). O citado material

apresenta permeabilidade na mesma ordem de grandeza ou até menor que as argilas. Além disso, é possível que o custo de um núcleo com argila seja bem mais elevado, pois o volume de material necessário para construção de um núcleo com mistura asfáltica é menor. Dessa forma, a mistura asfáltica pode representar uma alternativa viável do ponto de vista técnico e econômico. Ademais, na região que compreende o semi-árido brasileiro, nota-se a presença de um grande número de pedreiras que comercializam os agregados utilizados na produção de misturas asfálticas. De acordo com Bernucci *et al.* (2010), os agregados representam cerca de 95% do volume total da mistura asfáltica. Portanto, é de fundamental importância avaliar a viabilidade desse material (mistura asfáltica) como alternativa ao uso da argila como núcleo em barragens de terra.

2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de misturas asfálticas em alternativa ao uso da argila como núcleo de barragens de terra.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos foram traçados. Os três primeiros objetivos específicos foram obtidos por meio de simulação numérica de fluxo d'água. O último objetivo específico foi obtido através da comparação de preços em uma análise de custos. A seguir os objetivos são listados:

- Verificar o comportamento da vazão d'água em uma seção transversal de uma barragem com núcleo de argila e em outra com núcleo de mistura asfáltica;
- Verificar as alterações nos valores da vazão quando as espessuras do núcleo com argila e do núcleo com mistura asfáltica são modificadas;
- Verificar as alterações no valor da vazão quando o k tanto das argilas quanto das misturas asfálticas são alterados;
- Determinar uma equação que relaciona a espessura de núcleo de argila equivalente para se construir um núcleo com mistura asfáltica com a mesma vazão;
- Comparar os custos de um núcleo de barragem composto por argila e de um núcleo composto por mistura asfáltica.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 BARRAGENS DE TERRA

As barragens de terra são obras muito conhecidas no cotidiano da engenharia civil, onde se encontram várias construções antigas, desde o antigo Egito até os dias atuais. De acordo com Oliveira (2014), as barragens são obras construídas transversalmente ao curso d'água. Essas estruturas possuem a finalidade de obstruir o fluxo de água, conseguindo retê-la para as mais diversas utilidades, tais como: abastecimento, geração de energia, navegação, irrigação, controle de enchentes, perenização de rios, piscicultura e lazer. Segundo Costa (2012), as barragens, dependendo do seu objetivo, podem ser divididas em dois grandes grupos:

- a) De regularização: tem a finalidade de regularizar o regime hidrológico de um rio, ou seja, armazenar água no período de afluência em relação à demanda. Com esta operação, a amplitude de variação das vazões naturais do rio é reduzida, garantindo-se assim, vazões efluentes, nos períodos de estiagem, superiores aos naturais;
- b) De retenção: tem a finalidade de reter água, amortecendo a onda de cheias para evitar inundações, podem ser utilizadas também para a retenção de sedimentos ou resíduos industriais. No caso de amortecimento de cheias, a onda de cheia é temporariamente armazenada, sendo posteriormente liberada, de tal modo que não cause danos a jusante.

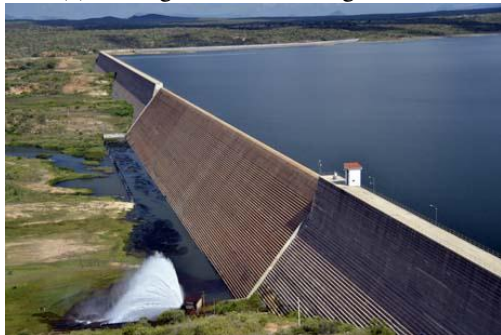
Ainda, de acordo com Massad (2010), as barragens atualmente em uso podem ser divididas em vários tipos, sendo eles:

- a) Barragem de concreto gravidade (concreto massa): tipo de barragem que funciona em função do seu peso e em geral, requer fundações em rocha por questões de capacidade de suporte do terreno. A Figura 1a mostra uma barragem do tipo concreto gravidade.
- b) Barragem de concreto estrutural com contrafortes: como o próprio nome já diz, são barragens construídas de concreto estrutural e constituídas de lajes ou abóbodas múltiplas inclinadas, apoiadas em contrafortes. A Figura 1b mostra uma barragem de concreto estrutural com contrafortes.
- c) Barragem de concreto em arco de dupla curvatura: é possível ser construída engastada em vales fechados e a sua dupla curvatura assemelha-se com uma “casca”. A Figura 1c apresenta uma ilustração de uma barragem de concreto em arco de dupla curvatura.

- d) Barragem de terra homogênea: tem sua composição de um material predominante. É o tipo de barragem mais comum entre todas as outras devido às condições topográficas e a disponibilidade de material encontrado no Brasil. É definida a inclinação dos taludes de modo a garantir a estabilidade durante a vida útil da barragem. A Figura 1d mostra uma ilustração da seção de uma barragem de terra homogênea.
- e) Barragem de terra-enrocamento: é a mais estável dentre as barragens de terra e terra-enrocamento, não havendo registro de rompimento envolvendo seus taludes. O núcleo argiloso imprime a estanqueidade à barragem, permitindo o represamento da água. A Figura 1e mostra uma barragem de terra-enrocamento, com o enrocamento garantindo a estabilidade da mesma.
- f) Barragem de enrocamento com membrana de concreto: apresentam, como septo impermeável, placas de concreto sobre o talude montante, de enrocamento. A Figura 1f mostra uma ilustração de uma barragem de enrocamento com membrana de concreto.
- g) Barragem em aterro hidráulico: barragens em que o aterro é construído por processo hidráulico, isto é, o solo é transportado com água, por meio de tubulações até o local da construção. A Figura 1g mostra uma ilustração de uma barragem de aterro hidráulico.

Figura 1 - Tipos de Barragens

(a) Barragem de concreto gravidade



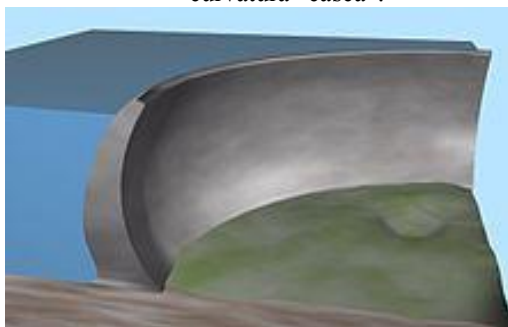
Fonte: <http://blogdojp.com.br/?p=13859>

(b) Barragem de concreto estrutural com contrafortes



Fonte: <http://www.touristlink.com.br/Fran%C3%A7a/contraforte-barragem/overview.html>

(c) Barragem de concreto em arco de dupla curvatura “casca”.



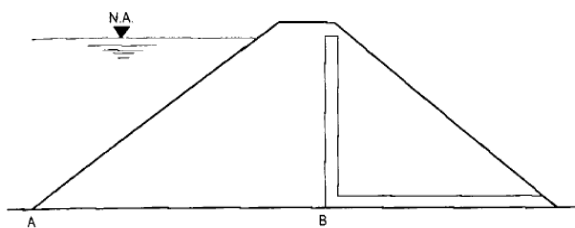
Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Barragem_em_arco

(e) Barragem de terra-enrocamento



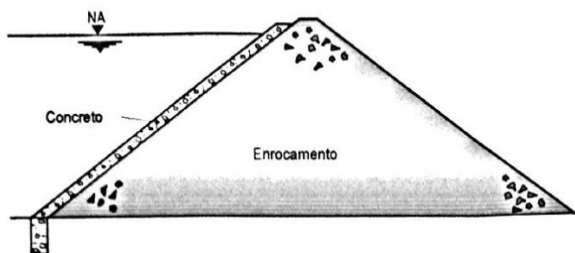
Fonte: DNOCS

(d) Seção típica de uma barragem de terra homogênea com um dreno vertical



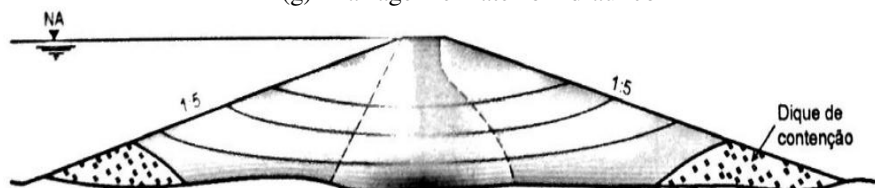
Fonte: Massad (2010)

(f) Barragem de enrocamento com membrana de concreto



Fonte: Massad (2010)

(g) Barragem em aterro hidráulico



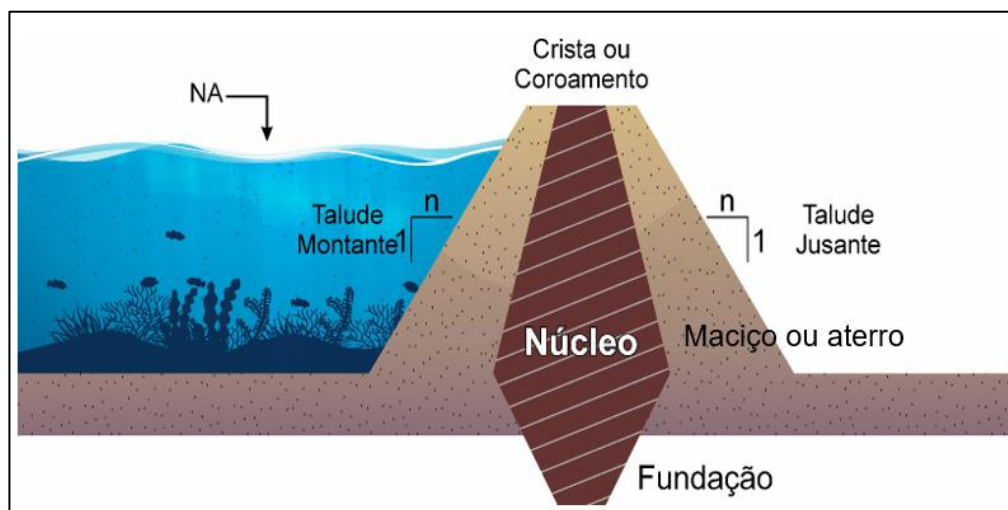
Fonte: Massad (2010)

Fonte: Autor

3.1.1 Componentes de uma Barragem de Terra

Segundo Chiossi (2013), o corpo de uma barragem de terra pode ser dividido, de modo simplificado, em seis elementos básicos, sendo eles: fundação, maciço ou aterro, crista ou coroamento, talude montante, talude jusante e núcleo. A Figura 2 mostra um exemplo de um perfil de uma barragem e seus componentes. Todos eles possuem características essenciais para o perfeito funcionamento de uma barragem. Porém, o núcleo é um dos elementos que mais necessita de atenção durante o projeto, pois é o responsável pela estanqueidade da estrutura. O maciço aterro também pode ser chamado de enrocamento e é responsável por garantir boa parte da estabilidade da estrutura. Os taludes representam as inclinações do corpo da barragem e depende do atrito entre os grãos do material que será utilizado.

Figura 2 - Perfil de uma barragem e seus elementos



Fonte: Autor

3.2 ESTUDO DA ÁGUA NO SOLO

Segundo Oliveira (2014), o solo é um material onde suas partículas sólidas se encontram de forma aleatória, posicionadas umas sobre as outras e com vazios entre elas. Na grande maioria dos estudos sobre água nos solos em engenharia, a mesma ocupa a maior parte ou a totalidade dos seus vazios, deixando as demais partes apenas com ar. De acordo com Pinto (2006), quando a água é submetida a uma diferença de carga (variação de nível d'água), ela se desloca (percola) no interior do solo. Os estudos da percolação da água no solo são

importantes pois intervêm num grande número de problemas para a engenharia, sendo dividido em três tipos:

- a) No cálculo das vazões, observando-se, por exemplo, a quantidade de água que infiltra em uma determinada escavação;
- b) Na análise de recalques, pois o mesmo está diretamente relacionado a diminuição do índice de vazios;
- c) Nos estudos de estabilidade, porque a tensão efetiva no solo depende da pressão neutra, que por sua vez, depende das tensões provocadas pela percolação da água.

Para que se tenha uma melhor compreensão sobre o estudo da água no solo, a permeabilidade de um determinado material e as análises de percolação, é necessário estar ciente das definições de cargas hidráulicas e forças de percolação. Pinto (2006), apresenta essas definições da seguinte maneira.

3.2.1 Cargas Hidráulicas

Quando se fala do estudo de fluxos de água, é comum expressar as componentes de energia pelas cargas correspondentes em termos de altura de coluna d'água. Estudos realizados pelo cientista suíço Daniel Bernoulli, demonstraram que a Carga Total (h) ao longo de qualquer linha de fluxo de um fluido incompressível permanece constante. E ainda, que a carga total é dada pela soma de três parcelas, como mostra a Equação 1:

$$\text{Carga Total} = \text{Carga Piezométrica} + \text{Carga Altimétrica} + \text{Carga Cinética} \quad (1)$$

Contudo, no estudo da percolação de água pelos solos, a carga cinética torna-se desprezível, pois as velocidades em que o fluido percola no solo é muito baixa. Assim, a equação básica para esse estudo pode ser representada pela Equação 2:

$$\text{Carga Total} = \text{Carga Piezométrica} + \text{Carga Altimétrica} \quad (2)$$

A carga altimétrica é simplesmente a diferença de cota entre o ponto considerado e qualquer outra cota definida como referência. Enquanto que, a carga piezométrica é a pressão neutra (pressão exercida pela água que preenche os vazios do solo) no ponto de referência,

expressa em altura de coluna d'água. Ainda, a carga total pode ser expressa de acordo com a Equação 3. As Figuras 3a e 3b, mostra exemplos práticos de maneira a facilitar a compreensão.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z \quad (3)$$

Onde:

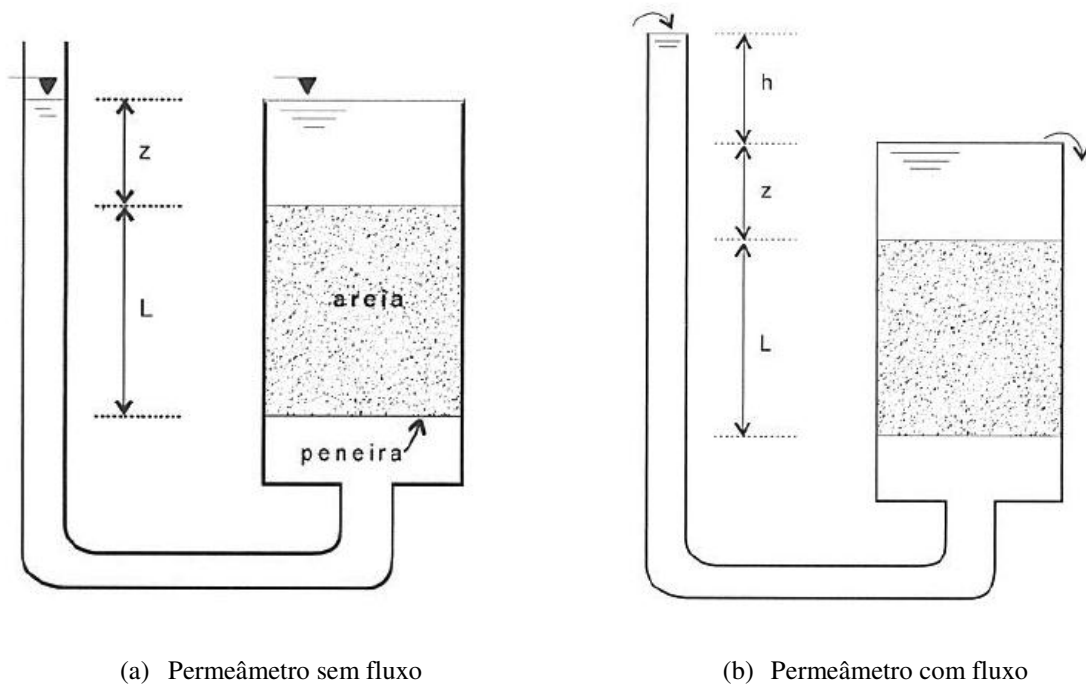
h = Carga total;

u = Pressão da água ou pressão neutra;

γ_w = Peso específico da água;

z = Carga altimétrica.

Figura 3 - Ilustração para conceito de cargas hidráulicas



Fonte: PINTO (2006)

Na Figura 3a, tomando como referencial a face inferior da areia (peneira), observa-se que, na face superior a carga altimétrica é L e a piezométrica é z . Portanto, a carga total é $L +$

z . Na face inferior, a carga altimétrica é nula e a total é igual a piezométrica $L + z$. Logo, para essa situação, não haverá fluxo devido não existir diferença de potencial.

Na Figura 3b, tomando como referencial a face inferior da areia, observamos que, na face superior a carga altimétrica é L e a piezométrica é z . Portanto, a carga total é $L + z$. Na face inferior, a carga altimétrica é nula e a total é igual a piezométrica $L + z + h$. Logo, para essa situação o fluxo é de baixo para cima. Do lugar de maior carga para o de menor carga.

3.2.2 Força de Percolação

Como analisado anteriormente, na Figura 3b, é gerado um fluxo de baixo para cima. Isso acontece porque há uma diferença entre as cargas totais nas faces de entrada e saída, que é expressa pelo valor de h . Essa diferença de carga corresponde a pressão $h \cdot \gamma_w$, que é dissipada em atrito viscoso na percolação através do solo. Devido a dissipação ser pelo atrito, ela gera uma força de arraste atuando nas partículas na direção do movimento, que tende a carregá-las. Porém, o próprio peso das partículas se contrapõe a essa força, ou ainda, ações externas evitam o carregamento. A força dissipada pode ser expressa pela Equação 4.

$$F = h \times \gamma_w \times A$$

(4)

Onde:

F = Força que atua nas partículas;

h = Carga total;

γ_w = Peso específico da água;

A = Área da seção do corpo de prova.

Em um fluxo uniforme, essa força F é dissipada uniformemente em todo o volume de solo, $A \cdot L$, de tal forma que a força por unidade de volume pode ser expressa pela Equação 5. Definindo assim, uma força de percolação da água no solo igual ao produto do gradiente hidráulico pelo peso específico da água.

$$j = \frac{h \times \gamma_w \times A}{A \times L} = \frac{h}{L} \times \gamma_w = i \times \gamma_w$$

(5)

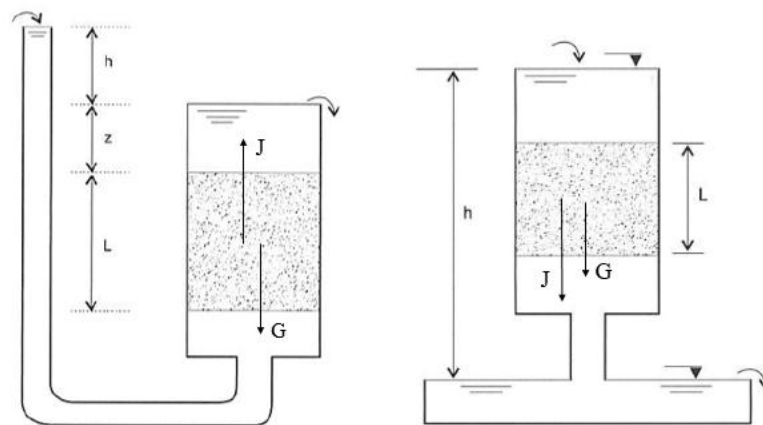
Onde:

j = Força de percolação;

i = Gradiente Hidráulico.

A força de percolação é uma grandeza semelhante ao peso específico e atua de forma parecida à força gravitacional. Quando essas forças atuam em sentidos contrários (fluxo d'água de baixo para cima), elas se subtraem, e se somam quando atuam em um mesmo sentido (fluxo d'água de cima para baixo). A Figura 4 mostra uma ilustração dessas duas ações, respectivamente.

Figura 4 - Ilustração da atuação das forças de percolação e gravitacional em um corpo de prova



Fonte: PINTO (2006)

3.3 PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS

De acordo com Caputo (1988), a permeabilidade é definida como sendo a propriedade que o solo tem de permitir a passagem de água pelos seus vazios, sendo numericamente expresso pelo seu Coeficiente de Permeabilidade (k). Cruz (2004), afirma que,

um meio pouco permeável é um meio que oferece uma grande dificuldade à passagem de fluidos, enquanto uma permeabilidade elevada ofereceria ao fluxo uma maior facilidade de movimento.

3.3.1 A Lei de Darcy

Por volta de 1856, o engenheiro Francês Henri Darcy verificou como os diversos fatores geométricos, indicados na Figura 3b, influenciavam na vazão da água através de um solo, definindo experimentalmente a Equação 6.

$$Q = k \times \frac{h}{L} \times A$$

(6)

Onde:

Q = Vazão;

k = Uma constante para cada solo, conhecida como coeficiente de permeabilidade;

$\frac{h}{L}$ = Carga dissipada na percolação pela distância ao longo da qual a mesma é dissipada. É também conhecida como gradiente hidráulico (i);

A = Área da seção transversal do permeâmetro.

Se substituirmos a relação h/L por i (conhecido por gradiente hidráulico), a lei de Darcy pode ser rescrita de acordo com a Equação 7. Além disso, a vazão dividida pela área indica a velocidade com que a água sai da amostra. A velocidade v é chamada de velocidade de percolação. Em função dela, a Lei de Darcy pode ser reescrita de acordo com a Equação 8.

$$Q = k \times i \times A$$

(7)

$$v = k \times i$$

(8)

3.3.2 Tipos de Ensaio para se Determinar o Coeficiente de Permeabilidade (k)

De acordo com Pinto (2006), para que se possa determinar o valor de k dos solos, são comumente utilizados dois procedimentos de ensaios, sendo eles:

a) Permeâmetro de carga constante (CC)

Esse método é uma repetição da experiência de Darcy. O permeâmetro geralmente se apresenta na maneira da Figura 5. Mantida a carga constante (h), durante um determinado intervalo de tempo, a água percolada é colhida e tem o seu volume medido. Conhecidas a vazão e as características geométricas, o coeficiente de permeabilidade é calculado diretamente através da Equação 9:

$$k = \frac{Q \times L}{h \times A \times t}$$

(9)

Onde:

k = Coeficiente de permeabilidade do material ensaiado (cm/s);

Q = Vazão medida (cm³);

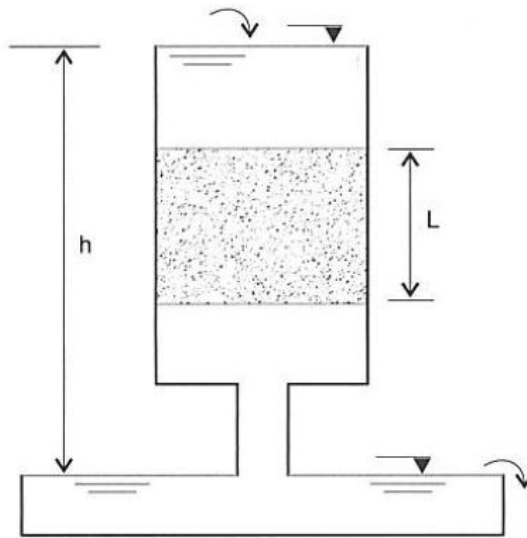
L = Altura do corpo de prova na direção do fluxo (cm);

A = Área da seção transversal do corpo de prova (cm²);

h = Carga hidráulica (cm);

t = Tempo decorrido do ensaio.

Figura 5 - Modelo para análise de um permeâmetro de carga constante

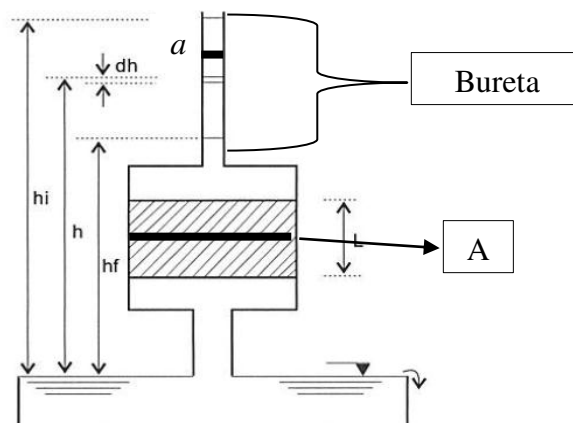


Fonte: PINTO (2006)

b) Permeômetro de carga variável (CV)

O ensaio de carga variável deve ser empregado quando o volume de água que passa pela amostra é pequeno, por isso, deve-se determinar o tempo que a altura da água leva para baixar em um valor de dh . Ou seja, é realizado quando se tem um material com o valor de k muito baixo, pois é bem mais preciso que o ensaio CC. A Figura 6 mostra um esquema para esse tipo de ensaio.

Figura 6 - Modelo para análise de um permeômetro de carga variável



Fonte: PINTO (2006)

A análise é feita através da verificação do tempo que a água leva para baixar da altura inicial h_i à altura final h_f . Num instante t qualquer, a partir do início, a carga é h e o gradiente hidráulico é h/L . A vazão será dada conforme a Equação 7. Igualando a vazão da água que passa pelo solo com a vazão da água que passa pela bureta, e posteriormente integrando as equações em relação a condição inicial ($h = h_i$, $t = 0$) e final ($h = h_f$, $t = t_f$), podemos chegar a Equação 10, utilizada para determinar a permeabilidade através desse tipo de ensaio.

$$k = 2,3 \frac{a \times L}{A \times t} \log \frac{h_i}{h_f}$$

(10)

Onde:

k = Coeficiente de permeabilidade do material ensaiado (cm/s);

a = Área da seção transversal da bureta (cm²);

L = Altura do corpo de prova na direção do fluxo (cm);

A = Área da seção transversal do corpo de prova (cm²);

t = Variação do tempo entre as cargas hidráulicas final e inicial (s);

h_i = Carga hidráulica inicial (cm);

h_f = Carga hidráulica final (cm).

3.3.3 Fatores que influenciam no valor de k

a) Influência do estado do solo

Taylor (1948 apud PINTO, 2006) definiu uma equação que correlaciona o coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios do solo, concluindo que, quanto mais solto o solo, mais permeável ele é. E ainda, quando conhecido o valor de k para um determinado índice de vazios (e) de um solo, pode-se calcular o k para outro e através de uma proporcionalidade, que é expressa pela Equação 11.

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\frac{e_1^3}{(1+e_1)}}{\frac{e_2^3}{(1+e_2)}}$$

(11)

b) Influência do grau de saturação

Para se determinar o valor de k de um solo, de acordo com os ensaios CC e CV, é necessário que o mesmo esteja totalmente saturado, ou seja, sem a presença de vazios. A percolação da água não remove totalmente os vazios no interior do solo, deixando bolhas de ar contidas pela tensão superficial da água, e que constituem obstáculos ao fluxo da água. Portanto, mesmo que com uma pequena diferença, o valor de k para um solo não saturado diverge do valor para um solo saturado, pois o mesmo é função do nível de saturação da amostra. (PINTO, 2006).

c) Influência da estrutura e anisotropia

O arranjo no qual estão dispostos os grãos do solo influencia na sua permeabilidade. Os solos residuais apresentam valores de k maiores em virtude dos macroporos em suas estruturas. Em geral, quando é compactado mais seco, a disposição das partículas permite maior passagem de água do que quando compactado mais úmido, ambos com o mesmo índice de vazios. (PINTO, 2006).

Na grande maioria dos casos, o solo não é isotrópico em relação à permeabilidade. Sendo comum, apresentar valores de k maiores na direção horizontal quando comparados à direção vertical. Esse fator é decorrente do posicionamento das partículas do solo quando compactadas, que tendem a ficar com suas maiores dimensões no sentido horizontal. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos por Oliveira (2003) em ensaios para se determinar os valores de permeabilidade horizontal e vertical.

Tabela 1: Resultados encontrados por Oliveira (2003) para determinação da permeabilidade horizontal e vertical.

Misturas Asfálticas	Permeabilidade	k (cm/s)
I	Vertical	0,45
	Horizontal	0,63
II	Vertical	0,39

Horizontal	0,60
------------	------

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2003)

3.3.4 Permeabilidade dos solos e das misturas asfálticas

Na literatura encontra-se diversos autores definindo o valor de k para cada tipo de solo ou de misturas asfálticas já ensaiadas em laboratório. A Tabela 2 mostra os valores de k para cada solo - importante na análise de fluxo da água em solos e enrocamento - de acordo com os diferentes autores pesquisados.

Tabela 2: Valores dos coeficientes de permeabilidade (k) para solos.

Autor/Solo	PINTO (2006)	CAPUTO (1988)	CRUZ (2004)
Argilas	$< 10^{-9}$ m/s	$< 10^{-9}$ m/s	10^{-9} a 10^{-10} m/s
Siltes	10^{-6} a 10^{-9} m/s	10^{-3} a 10^{-9} m/s	10^{-4} a 10^{-5} m/s
Areias argilosas	10^{-7} m/s	10^{-3} a 10^{-9} m/s	10^{-6} m/s
Areias finas	10^{-5} m/s	10^{-3} a 10^{-9} m/s	10^{-1} m/s
Areias médias	10^{-4} m/s	10^{-1} a 10^{-3} m/s	10 m/s
Areias grossas	10^{-3} m/s	10^{-1} m/s	> 10 m/s

Fonte: Autor

De acordo com Souza Neto (2013), a característica prioritária do núcleo de uma barragem quando é construído com misturas asfálticas é a estanqueidade, pois o núcleo é o único elemento impermeabilizante da barragem, ou seja, é ele quem garante boa parte da funcionalidade da barragem e que é responsável por parar ou diminuir o fluxo d'água naquele percurso. De acordo com ensaios realizados por Falcão (2007), a ordem de grandeza das misturas asfálticas produzidas para utilização em barragens pode chegar à 10^{-12} m/s. Portanto, tornam-se uma ótima alternativa de utilização como núcleo de barragens, visto que durante o projeto, elas não se incluem em características estruturais importantes. A Tabela 3 mostra alguns valores de k para misturas asfálticas encontrados em pesquisas e ensaios, variando de acordo com o seu Volume de Vazios (V_v) e teor de Ligante Asfáltico (LA). Ainda, a Tabela 4 mostra uma classificação das misturas asfálticas de acordo com o seu valor de k .

Tabela 3: Valores dos coeficientes de permeabilidade (k) para misturas asfálticas.

Autor		Mistura	Vv (%)	LA (%)	k (m/s)
FALCÃO (2007)	CA	Micaxisto	2,0	5,5	2,30E-11
		Calcário	1,3	5,5	1,00E-11
		Granito	1,4	5,5	9,50E-12
FERREIRA (2013)		CA	4,0	5,0	8,40E-07
			7,0	5,0	3,70E-06
		AA	7,0	5,0	1,90E-07
			9,0	5,0	2,50E-07
		CPA	20,0	5,0	1,09E-04
			23,0	5,0	1,24E-04
NASCIMENTO (2005)		CA	4,0	6,5	1,70E-07
			12,0	6,5	3,40E-07
CHAVES (2010)		AA	20,0	5,5	3,20E-05
			19,0	6,0	2,90E-05
SOUZA (2008)		CPA	26,0	4,7	1,70E-04
			25,0	5,2	6,80E-05

Fonte: Autor

Tabela 4: Classificação de misturas asfálticas em termos de sua permeabilidade (adaptado de O'FLAHERTY, 2002).

k (m/s)	Classificação
1,00E-10	Impermeável
1,00E-08	Praticamente impermeável
1,00E-06	Drenagem baixa
1,00E-04	Drenagem razoável
1,00E-03	Drenagem alta

Fonte: Adaptado de O'FLAHERTY (2002)

A Tabela 4 mostra que, quanto menor o valor de k das misturas asfálticas expressas na Tabela 5, mais impermeável a mistura é. Ou seja, garante uma vazão menor, pois apresenta uma maior dificuldade para que a água possa percolar no solo.

3.4 PERCOLAÇÃO DA ÁGUA

De acordo com Assis (2003), os problemas relacionados a percolação necessitam de uma análise conservativa pelas incertezas normalmente envolvidas, sendo a permeabilidade, a principal delas. No caso de barragens, a percolação da água deve ser estudada minuciosamente, uma vez que pode apresentar diversos problemas graves para a estrutura. Esses problemas, podem ser divididos mais comumente em três tipos: “Piping” - também conhecido como erosão regressiva - é uma causa comum de rupturas e escorregamentos em barragens de terra e ocorre quando há o carreamento das partículas devido as forças de percolação; Saturação e instabilização de taludes, também possui suas causas devido as forças de percolação por fluidos emergentes no talude ou subpressões de fundação no pé das barragens; e por último, a perda excessiva de água, que acontece principalmente em reservatórios quando são alimentados por rios com pequena vazão.

3.4.1 Fluxo de água através de meios porosos ou Teoria da Percolação

A teoria do fluxo ou da percolação da água por meios porosos é de essencial utilização para que se possa determinar a quantidade de água que percola através de uma barragem, ou sob a mesma. Podendo assim, estimar as perdas d’água em um reservatório. Além disso, também é importante para definir a distribuição das pressões de água ou pressões neutras no corpo da barragem. Esta, com atenção elevada para as análises de estabilidade, dos gradientes hidráulicos de saída e verificação do potencial ao “piping”. (ASSIS, 2003).

Segundo Pinto (2006), quando um fluxo de água ocorre numa mesma direção, como no caso do permeâmetro ilustrado na Figura 3b, diz-se que o fluxo é unidimensional. Ainda, quando as partículas de água se deslocam em qualquer direção, tem-se um fluxo tridimensional. A Figura 7a mostra a presença de água em um poço, que é uma ótima representação desse tipo de fluxo. Porém, quando as partículas de água seguem por caminhos curvos, mas contidos em planos paralelos, o fluxo é bidimensional, como no caso da percolação da água pelas fundações de uma barragem. A Figura 7b mostra um exemplo de fluxo bidimensional. Logo, devido a frequente ocorrência desse tipo de fluxo em obras de engenharia e de sua importância na estabilidade e vazão das barragens, o fluxo bidimensional merece uma atenção especial.

Figura 7 - Exemplos de fluxo tridimensional e bidimensional

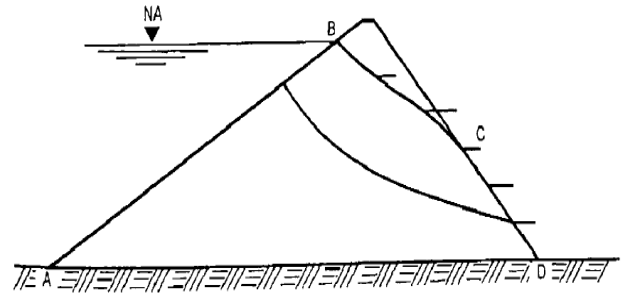
(a) Captação de água em poço ou cacimba, exemplo de fluxo tridimensional.



Fonte:

<http://www.hipernoticias.com.br/conteudo.php?cid=31164>

(b) Fluxo bidimensional em um perfil de uma barragem



Fonte: Massad (2010)

Fonte: Autor

É importante lembrar que para o estudo da percolação da água no solo é necessário que alguns axiomas sejam satisfeitos. Para tal, Assis (2003), define os mesmos da seguinte maneira:

- Os solos utilizados para o maciço e fundação sejam incompressíveis garantindo que não apresente variações nas dimensões dos poros;
- A percolação seja processada sob gradientes hidráulicos que são função das perdas de carga gravitacionais;
- Não ocorra mudanças no grau de saturação da zona em que há fluxo, de forma que se tenha uma garantia de que quantidade de volume de fluido que sai do elemento seja igual a quantidade de volume que entre, em um mesmo intervalo de tempo;
- Devem ser conhecidas as condições de contorno do fluxo.

Segundo Oliveira (2014), muitas dessas condições são satisfeitas no regime de fluxo constante. Que, para os casos de barragens, ocorre quando o nível d'água a montante está totalmente parado. É no regime constante que o fluxo atinge o seu equilíbrio, com grau de saturação sempre máximo e o índice de vazios permanece inalterado.

Ainda, de acordo com Oliveira (2014 apud Assis, 2013) estas condições são melhor satisfeitas quando se analisa maciços de areia ou brita, garantindo uma vazão de percolação comparativamente grande. Além disso a influência da capilaridade - tendência que o fluido tem de subir por entre os vazios - é pequena devido não haver ar nos vazios do solo. Quando se analisa maciços de solos finos, as forças capilares podem apresentar maior influência nas

pressões neutras do que as próprias cargas hidráulicas, fazendo com que a rede real de fluxo seja bem diferente da projetada. As análises realizadas para esse tipo de solo servem apenas para auxiliar a decisão do engenheiro.

De acordo com Das (2007), quando a percolação de água em um solo se dá em apenas uma direção - fluxo unidimensional - e de forma uniforme ao longo da seção perpendicular ao fluxo, a Lei de Darcy - como vista no item 3.3.1 - é suficiente para realizar a análise das vazões no próprio solo. Porém, na maioria dos casos, a água percola no solo em mais de uma direção - fluxo bidimensional e tridimensional - e de forma não uniforme ao longo da seção perpendicular ao fluxo, como é nos casos de barragens.

Na hidrodinâmica, ciência que estuda o movimento dos fluidos, encontra-se uma equação geral para um fluxo permanente como mostra a Equação 12.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (12)$$

Onde:

$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$ = derivada parcial de segunda ordem da carga em função da posição no eixo x;

$\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$ = derivada parcial de segunda ordem da carga em função da posição no eixo y;

$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}$ = derivada parcial de segunda ordem da carga em função da posição no eixo z.

De acordo com Assis (2003), para o caso de barragens de terra e enrocamento, onde o fluxo é bidimensional e considerando que o solo seja isotrópico - o valor de k é o mesmo em todas as direções - a fórmula da equação simplificada de Laplace pode ser utilizada, conforme Equação 13.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (13)$$

Esta última equação representa duas famílias de curvas que se interceptam ortogonalmente, formando figuras que se assemelham a uma malha, denominadas de redes de

fluxo. Uma das famílias são chamadas de linhas de fluxo e a outra de linhas equipotenciais. (ASSIS, 2003). Segundo Das (2007), um canal de fluxo representa o caminho pelo qual uma partícula de água se desloca de montante para jusante no meio de um solo permeável. Uma equipotencial é uma linha ao longo da qual a carga potencial é igual em todos os pontos, e são distanciadas uma da outra por iguais valores de perdas de carga.

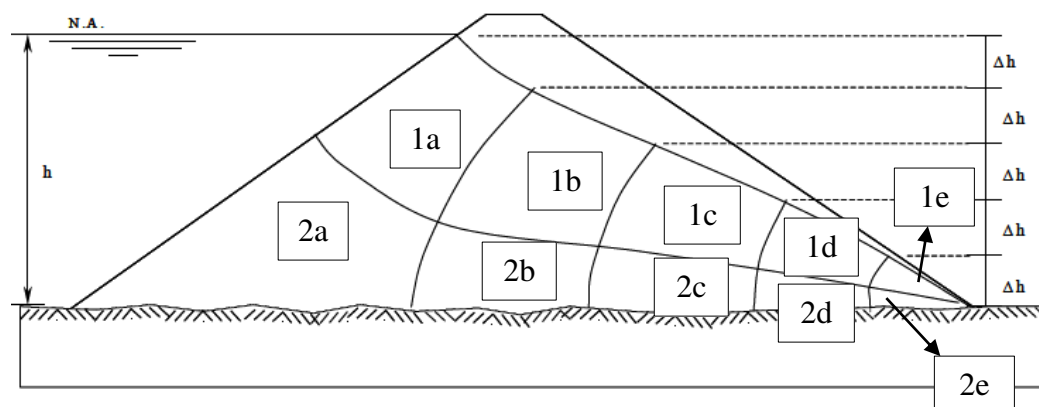
De acordo com Oliveira (2014), a solução da equação de Laplace fornece a distribuição das pressões e a direção do fluxo em todos os pontos do domínio do problema. Para um problema específico, a solução da equação é aquela que satisfaz suas condições de contorno. Existem diversos métodos que podem ser usados para obtenção dessas soluções, sendo eles: analíticos, analógicos, reduzidos, gráficos e numéricos.

3.4.2 Redes de Fluxo e Métodos para sua Determinação

De acordo com Das (2007), uma rede de fluxo é uma combinação de várias linhas de fluxo e linhas equipotenciais. Essas linhas são utilizadas no cálculo da percolação da água e na avaliação das cargas pelo meio. As condições que devem ser atendidas para o traçado de uma rede de fluxo em um gráfico são: as linhas equipotenciais devem cruzar as linhas de fluxo formando ângulos retos e a forma dos elementos de fluxo deve ser próxima a de um quadrado.

Dentre os métodos utilizados para o traçado das redes de fluxo, o método gráfico seria o mais utilizado. A Figura 8 mostra uma rede de fluxo obtida através do método gráfico em um perfil de uma barragem de seção homogênea.

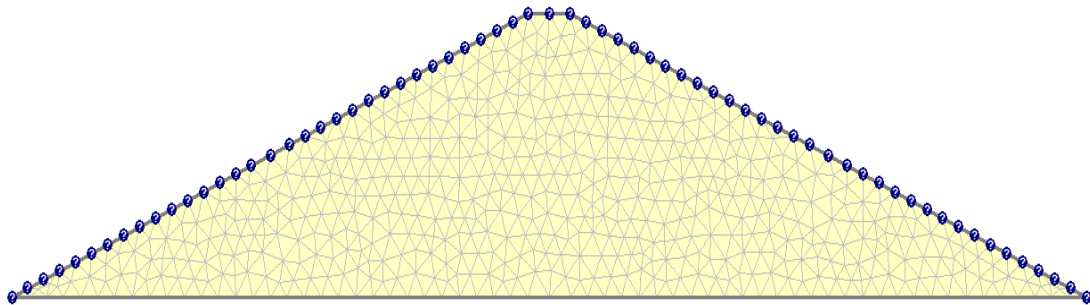
Figura 8 - Rede de fluxo em uma barragem de seção homogênea



Fonte: Assis (2003)

Porém, com o avanço computacional, houve a implementação dos métodos numéricos, sendo esses bem mais precisos, e posteriormente mais utilizados. Os métodos numéricos mais conhecidos são o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). A Figura 9 mostra a ilustração de uma malha determinada pelo *software* Slide 6.0 - que utiliza o MEF - para um perfil de uma barragem de seção homogênea.

Figura 9 - Ilustração do modelo de elementos finitos gerados pelo Slide 6.0



Fonte: Autor

De acordo com Pinto (2006), a vazão total de água que percola no solo também pode ser determinada, pela Lei de Darcy, através do número de canais de fluxo (N_f) e do número de equipotenciais (N_d). A Equação 14 mostra a vazão em função de N_d e N_f .

$$Q = k \times h \times \frac{N_f}{N_d} \quad (14)$$

Onde:

k = permeabilidade do solo;

h = carga total que será dissipada pelo solo;

N_f = número total de canais de fluxo, representado na Figura 8 pelos números, totalizando 2 canais;

N_d = número total de perdas de equipotenciais, representado na Figura 8 pelas letras (a – e), totalizando 5 perdas de equipotenciais;

$\frac{N_f}{N_d}$ = também conhecida como fator de forma (f).

4. METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos a geometria (seção hipotética avaliada), as propriedades hidráulicas (permeabilidade) dos materiais, bem como as condições de contorno utilizadas para as simulações numéricas de fluxo considerando as duas situações avaliadas: (i) barragem com núcleo composto por argila e (ii) barragem com núcleo composto por mistura asfáltica.

A seção hipotética (geometria) da estrutura foi definida através de pesquisa no sítio eletrônico do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). As propriedades dos materiais que foram analisados, foram definidas através de um levantamento de dados na literatura. Por fim, determinou-se as condições de contorno ao qual o perfil esteve submetido. Para o cálculo das vazões e análises de fluxo foi utilizado o *software* Slide 6.0.

Além da análise referente as questões técnicas, foi realizada uma análise econômica das duas alternativas (núcleo com argila e núcleo com mistura asfáltica). Para isso, utilizou-se o sítio eletrônico do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) para consultar os valores monetários do custo por metro cúbico da mistura asfáltica, bem como os valores do custo da argila.

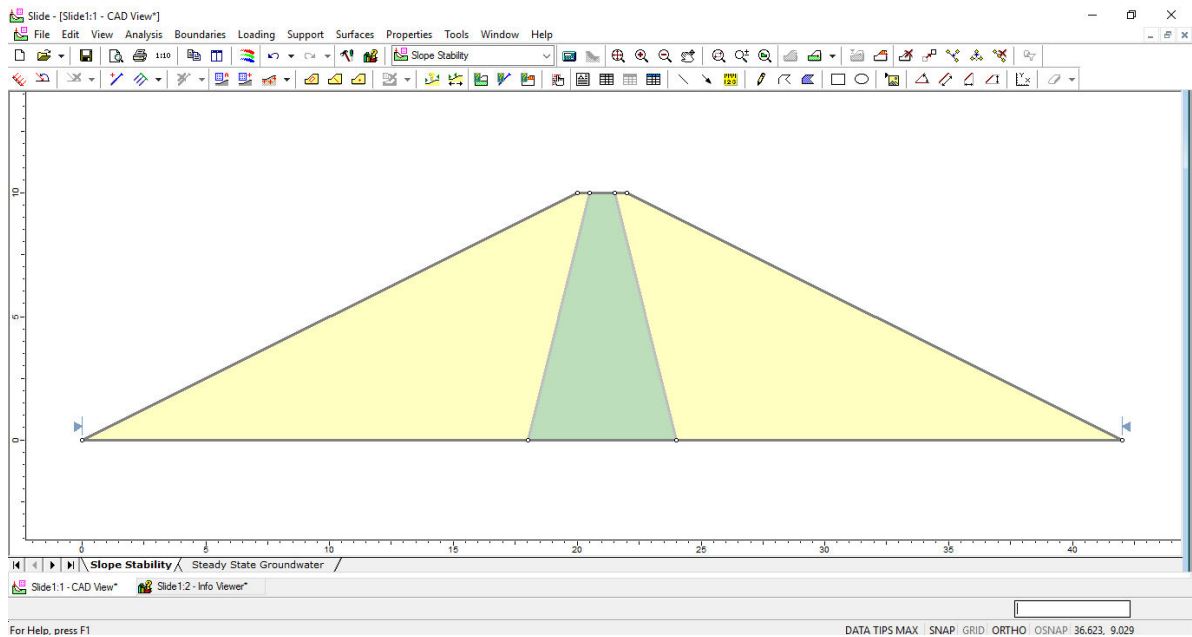
4.1 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE SLIDE 6.0

O Slide 6.0 é um dos programas da empresa *Rocscience*, e trata-se de um programa que permite a modelagem e a análise numérica tomando por base o Método dos Elementos Finitos (MEF), do fluxo d'água em barragens, aterros, escavações e outras situações de engenharia onde são encontrados materiais porosos. Nesse programa, é possível realizar análises de fluxo que vão desde o simples problema de fluxo permanente até as mais complexas análises em regime transiente. (FERREIRA, 2015). A Figura 9, vista anteriormente, mostrou um modelo de elementos finitos para um perfil de barragem gerado pelo Slide 6.0, com valor de 1500 elementos (número utilizados nas análises). Nesse programa, as situações são analisadas desde a modelagem de um problema até a obtenção da solução, e é compreendida em três etapas:

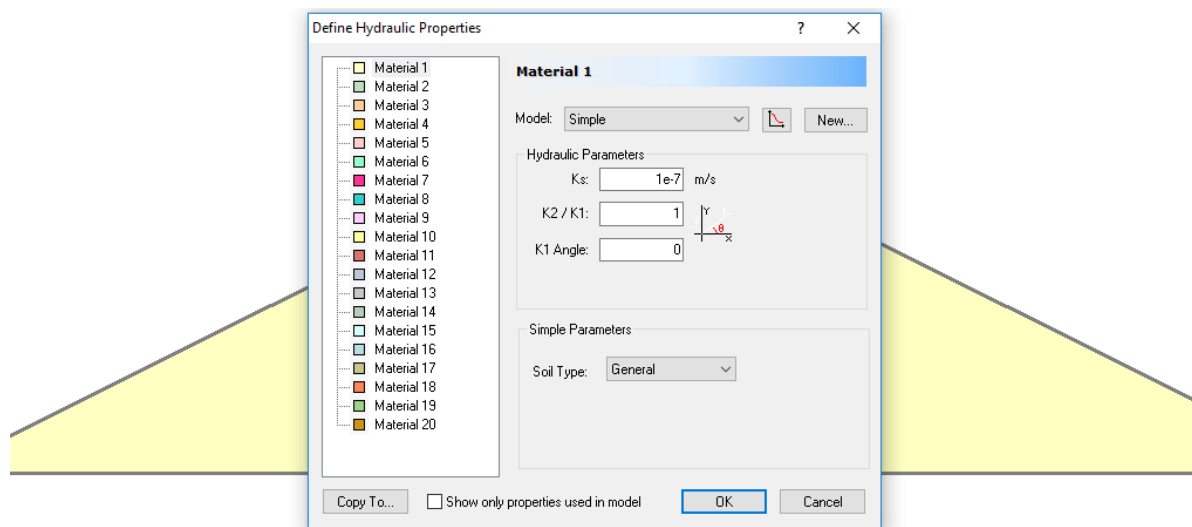
(1) Definição do problema (*Slide Model*): Etapa onde deve ser descrita a geometria do problema que será avaliado, bem como as características hidráulicas dos materiais que irão compor o mesmo. Além disso, nesta fase é possível gerar uma malha de elementos finitos automaticamente, essa responsável pelo método de cálculo do programa. Por fim, as

condições de contorno são impostas, podendo ser: carga hidráulica total, taxa de infiltração, taxa de fluxo, dentre outras. As Figuras 10a a 10d, mostra como é realizado esse procedimento.

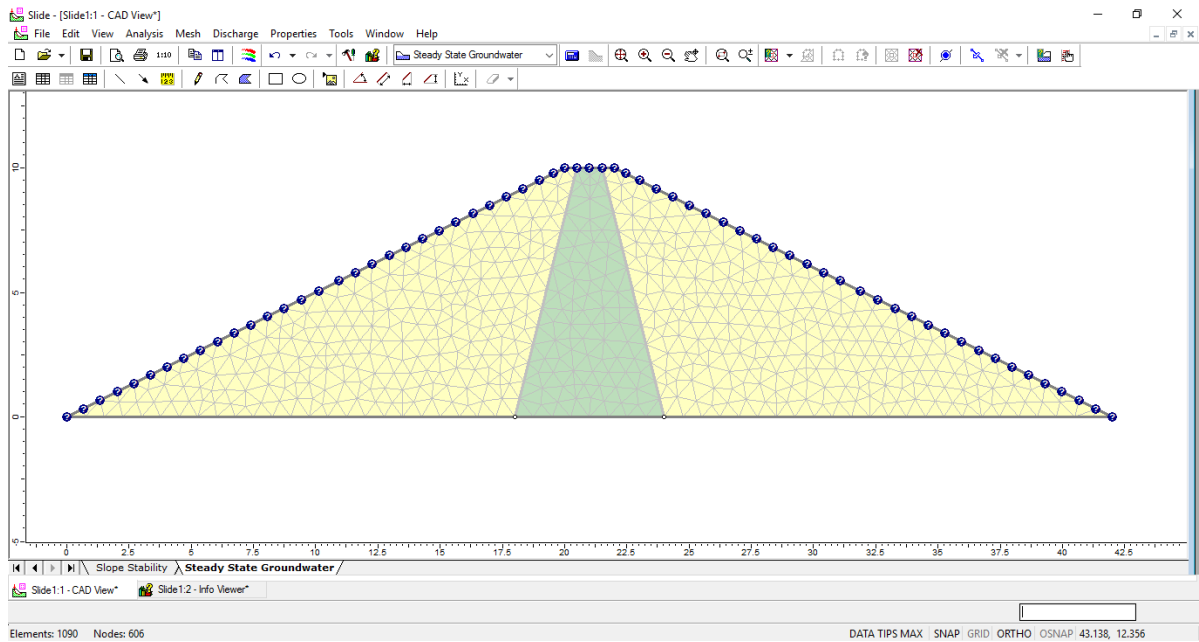
Figura 10 - Ilustração da etapa executada no Slide Model



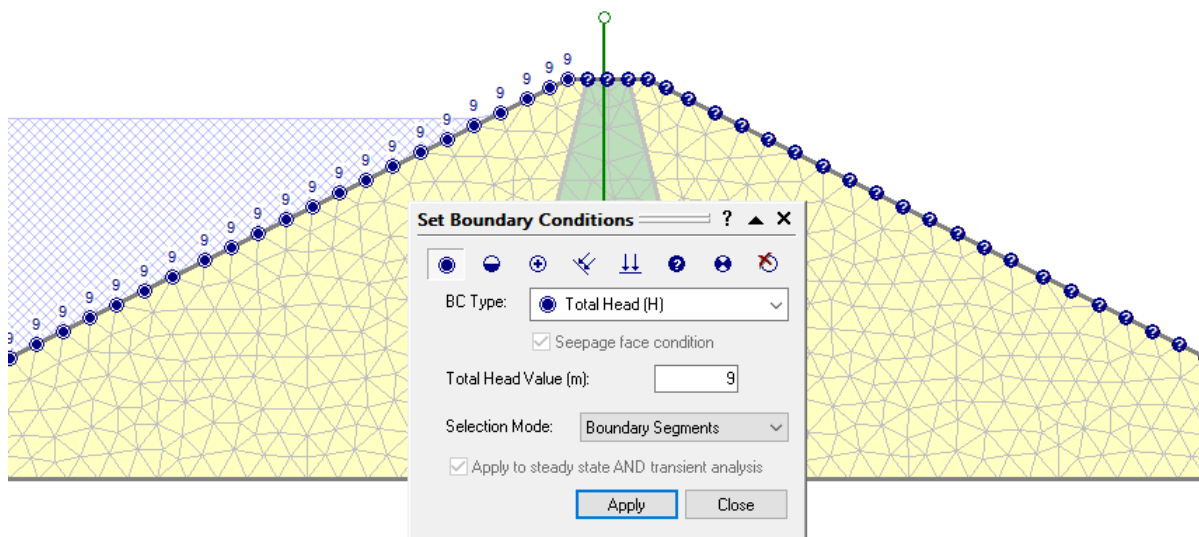
(a) Definição da geometria analisada



(b) Propriedades hidráulica dos materiais

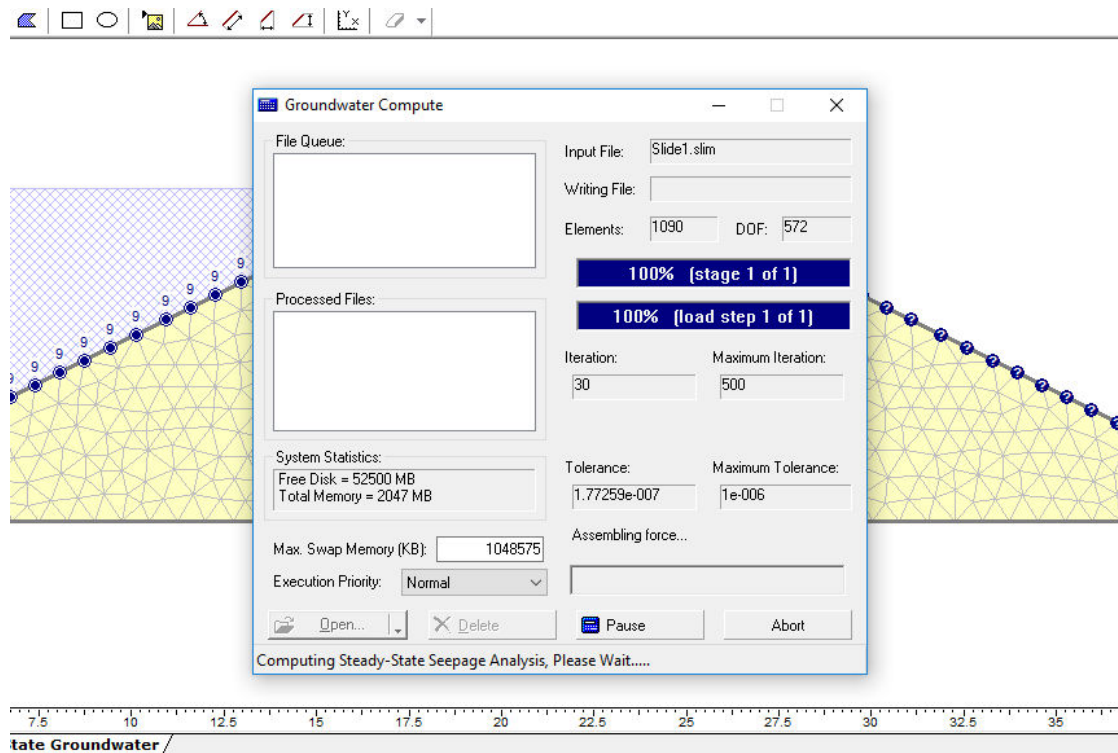


(c) Malha gerada pelo programa

(d) Condições de contorno da estrutura
Fonte: Autor

(2) Resolução do problema por processo iterativo (*Slide Compute*): Etapa responsável por realizar as iterações e obter a solução numérica do problema. Essas iterações, a depender da complexidade da análise, podem demorar alguns minutos ou até horas. Mas, para as situações avaliadas no presente estudo, as análises demoram em média, menos de 30 segundos. A Figura 11 mostra o *software* realizando o seu processo iterativo.

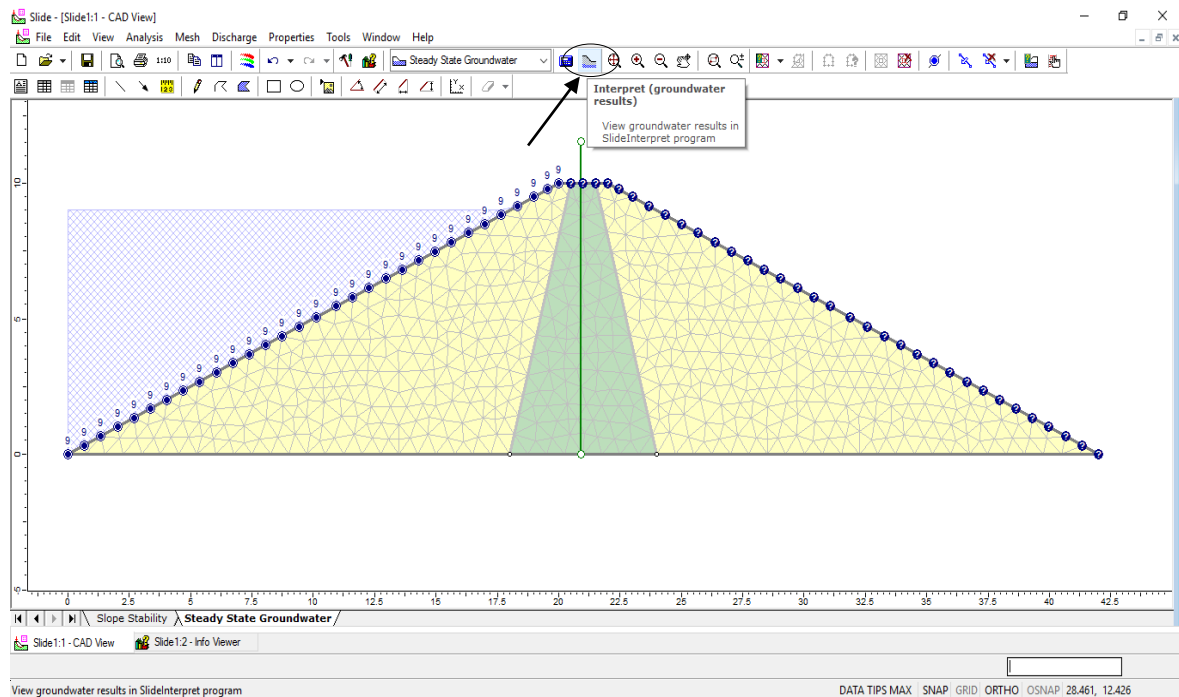
Figura 11 - Ilustração da etapa Slide Compute



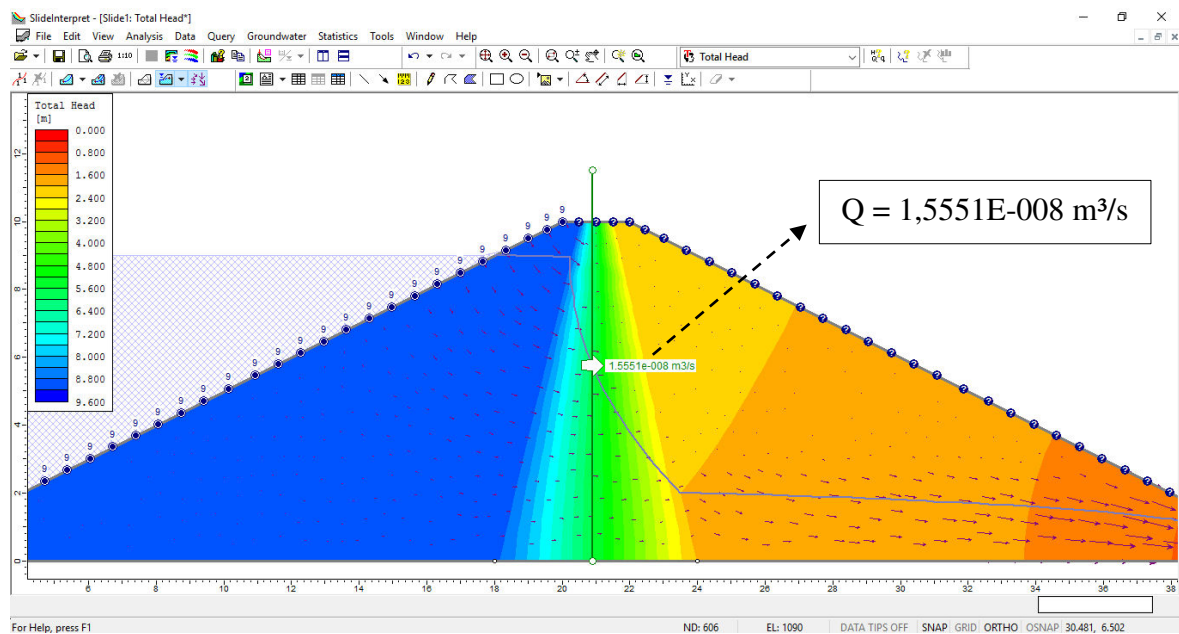
Fonte: Autor

(3) Visualização dos resultados (*Slide Interpret*): Etapa responsável pela interpretação e visualização dos resultados. A Figura 12 apresenta a solução final gerada pelo *Slide Interpret* de uma situação simulada para o caso de um perfil de uma barragem. A citada figura contém a representação da linha freática, as linhas equipotenciais, os vetores de fluxo (determinam as linhas e os canais de fluxo) e o valor da vazão no centro do núcleo.

Figura 12 - Ilustração do procedimento para o Slide Interpret



(a) Ícone do *Slide Interpret*



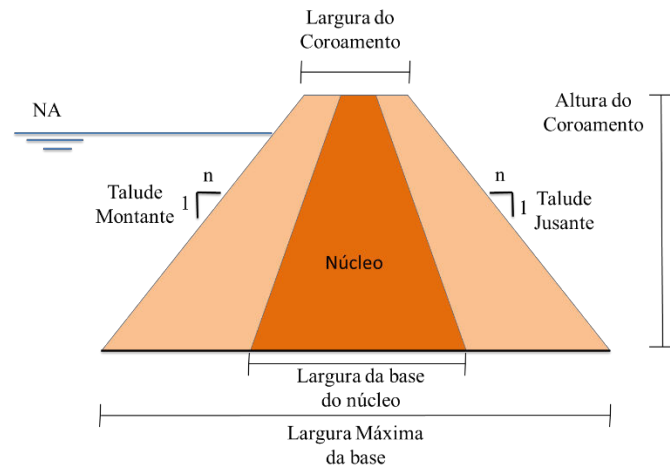
(b) Linha freática, equipotenciais, vetores de fluxo e valor da vazão no centro do núcleo

Fonte: Autor

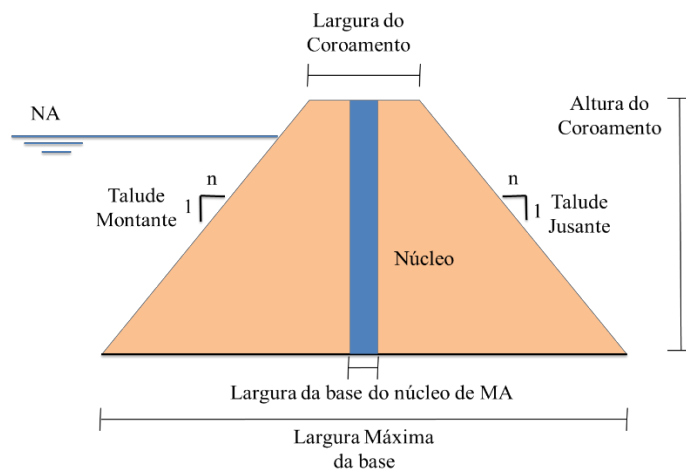
4.2 GEOMETRIA DA SEÇÃO HIPOTÉTICA

Inicialmente, foi realizado um levantamento de informações na literatura e no sítio eletrônico do DNOCS, a fim de verificar os valores típicos das dimensões das barragens de terra já construídas. A pesquisa consistiu em buscar características que definem o perfil de algumas das barragens mais influentes na região que compreende o Nordeste brasileiro. A Figura 13 mostra um esboço das informações (dimensões) necessárias para as análises de fluxo, respectivamente para os casos de argila e Mistura Asfáltica (MA).

Figura 13 - Dimensões buscadas no DNOCS e na literatura



(a) Dimensões para o núcleo com argila



(b) Dimensões para o núcleo com MA

Fonte: Autor

Todas as informações obtidas através do DNOCS podem ser encontradas na Tabela 5. Além dessas informações, são necessários, para complementar as análises de fluxo, as dimensões da base do núcleo com argila e espessura do núcleo com MA, encontrados na literatura. De acordo com Falcão (2007), os valores da ordem de 0,50H a 1,00H (altura do coroamento) tem sido normalmente utilizado em barragens de terra e enrocamento como valores de base de núcleo de argila (B). E ainda, para as MA, os valores de espessura (e) mais utilizados são 0,50m e 1,20m. Para uma análise mais exata e completa, decidiu-se variar a espessura de MA entre 0,50m e 3,00m, em intervalos iguais de 0,50m. Portanto, de modo a entender o comportamento geral da Vazão (Q) em um núcleo de argila, decidiu-se manter constante a largura do coroamento do núcleo (2m) e variar a largura da base do núcleo de argila (B) conforme os valores mencionados. Logo, B variou de 25m a 50m.

Tabela 5: Informações de barragens localizadas no Nordeste

Açude	Banabuiú	Açu	Orós	Araras
Nome da barragem	Arrojado Lisboa	Armando Ribeiro Gonçalves	Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira	Paulo Sarasate
Tipo	Terra Zoneada			
Cidade	Banabuiú	Açu	Orós	Reriutaba
Estado	Ceará	Rio Grande do Norte	Ceará	Ceará
Altura (m)	57,70	41,00	54,00	38,00
Largura Máxima da Base (m)	310,00	-	278,00	225,00
Extensão pelo coroamento (m)	824,00	2553,00	670,00	2600,00
Largura do coroamento (m)	12,00	8,00	10,00	8,00
Volume do aterro (milhões de m ³)	4,50	5,75	3,22	3,58
Talude Montante	1V:2,5H	1V:2H	1V:2,5H	1V:2,5H
Talude Jusante	1V:2,5H	1V:2,5H	1V:2H	1V:2,5H

Fonte: DNOCS

De acordo com os valores encontrados na Tabela 5, decidiu-se usar valores próximos das médias para as análises. Além disso, os demais valores utilizados foram os encontrados na literatura. A seção hipotética foi definida contendo as seguintes características:

- Tipo: Terra Zoneada;
- Altura do Coroamento (H): 50 metros;
- Inclinação dos taludes (Montante e Jusante): 1V:2,5H;
- Largura Máxima da Base: 260 metros;
- Largura do Coroamento: 10 metros.
- Largura do coroamento do núcleo: 2 metros (constante);
- Largura da base do núcleo de solo (B): $0,50H - 1,00H$ (25m – 50m);
- Espessura da base do núcleo de MA (e): 0,50m – 3,00m.

4.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS

De acordo com Falcão (2007), um dos critérios mais utilizados para avaliar o potencial da aplicação de misturas asfálticas em estruturas hidráulicas, como no caso do núcleo de barragens, é o Volume de Vazios (V_v). De acordo com o citado autor, o V_v deve apresentar valores inferiores a 3%. Com isso, observados os valores das propriedades de k para solos e do conjunto k e V_v para misturas asfálticas conforme apresentados no Capítulo 3 e na literatura em geral, decidiu-se utilizar os parâmetros da Tabela 6. Vale lembrar que, as misturas apresentadas por Ferreira (2013) e Nascimento (2005), mesmo mostrando valores de V_v próximos ao permitido, não foram analisadas pois tem valor de k com ordem de grandeza maior que o das argilas.

O valor de k para um núcleo de solo (argila) indicado na Tabela 6, foi utilizado após ser realizado um estudo do comportamento da vazão (Q) em função de B e k . Com esse valor, foi possível determinar uma largura da base de núcleo de argila (B) de modo que garantisse uma Q referente a cada espessura (e) de MA.

Tabela 6: Permeabilidade dos materiais utilizados

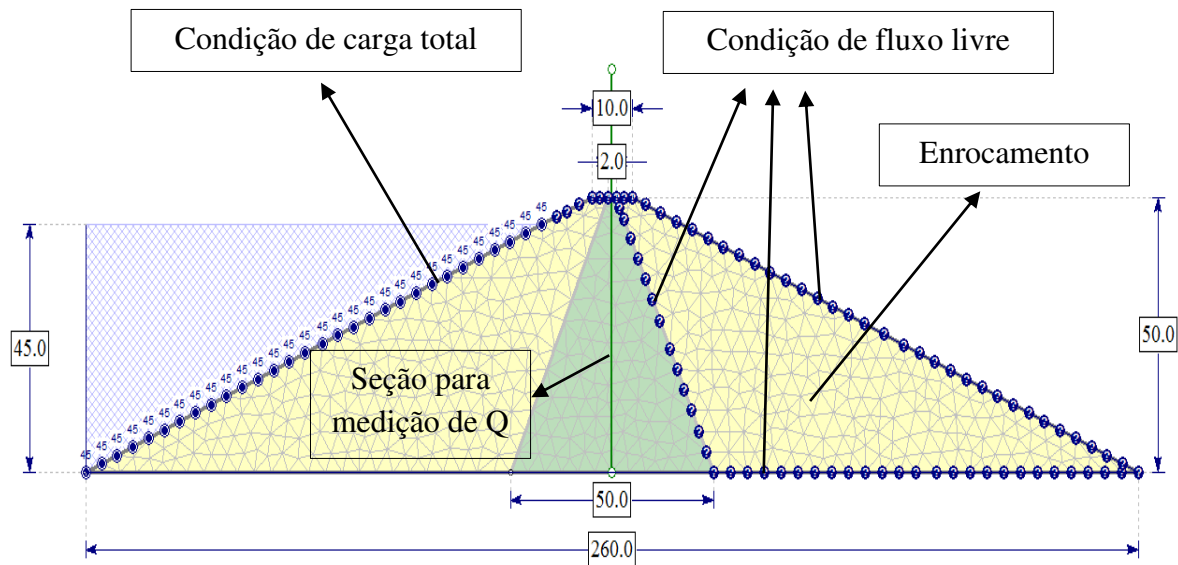
Material	k (m/s)
Enrocamento	1,0
Núcleo de solo (argila)	3,00E-09
FALCÃO (2007), Concreto Asfáltico com Micaxisto	2,30E-11
FALCÃO (2007), Concreto Asfáltico com Calcário	1,00E-11
FALCÃO (2007), Concreto Asfáltico com Granito	9,50E-11

Fonte: Autor

4.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA A ANÁLISE

As condições de contorno foram determinadas conforme pesquisas na literatura. De acordo com Falcão (2007), a carga hidráulica à montante para uma barragem pode ser expressa por 90% da altura do coroamento. Assim, para a seção hipotética analisada no presente trabalho, adotou-se uma Carga Total (h) constante com valor igual a 45m para a face montante do enrocamento. E ainda, foi imposta a condição de fluxo livre ao longo dos taludes (interno e externo) à jusante do núcleo, se estendendo por toda a base do enrocamento. A Figura 14 mostra o perfil de uma seção com as referentes condições de contorno. Além disso, também mostra a seção onde foi medida a vazão para todas as situações, localizada no centro do núcleo.

Figura 14 - Condições de contorno para a seção hipotética

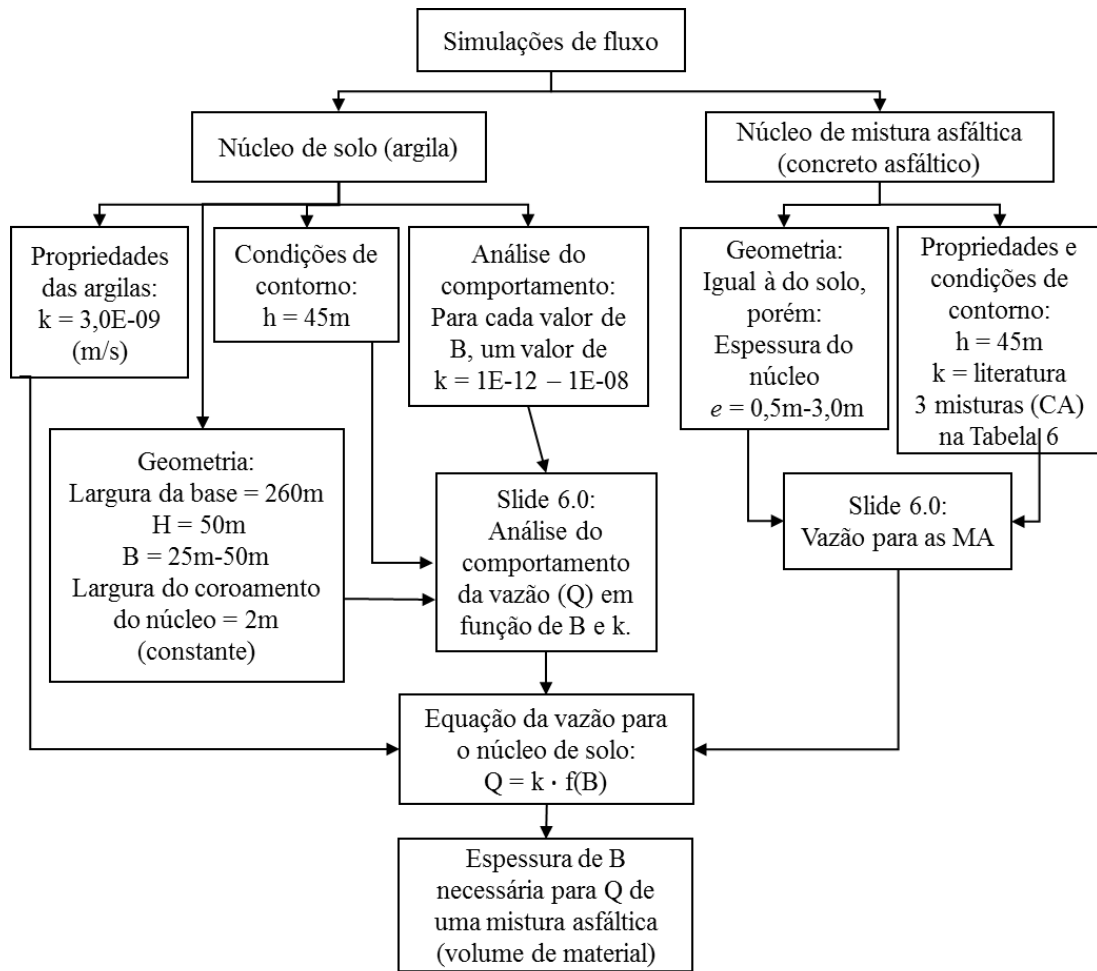


Fonte: Autor

4.5 SIMULAÇÕES DE FLUXO

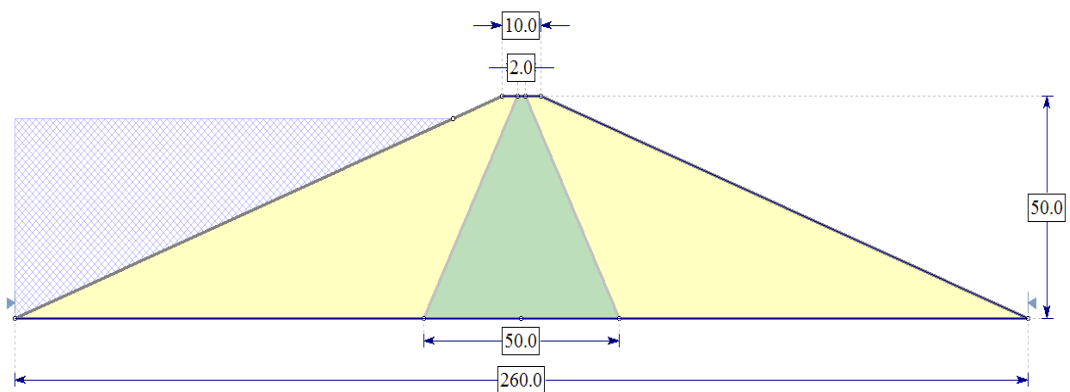
Esta etapa é responsável por definir uma Equação que permita uma comparação dos custos entre um núcleo com argila e um núcleo com mistura asfáltica. Consiste em entender o comportamento da vazão (Q) quando a largura da base do núcleo de argila (B) e o valor de k são alterados. É dividida em duas fases, uma fase de ensaios para uma barragem com núcleo de argila e outra com núcleo de mistura asfáltica. Para os ensaios com núcleo de argila, variou-se o valor de B de 25m até 50m, em intervalos iguais de 5m. E, para cada valor de B , variou-se também o valor de k de $1,0E-12m/s$ até $1,0E-08m/s$. Os ensaios realizados para uma barragem com núcleo de solo tem o objetivo de determinar uma Equação que relaciona o valor de Q em função de k e B , do tipo $Q = k \times f(B)$. Para os ensaios de MA, variou-se o valor de e de 0,50m até 3,00m, em intervalos iguais de 0,50m. E, para cada valor de e , variou-se também o valor de k conforme a Tabela 6. As Figuras 15 e 16 mostram um fluxograma das simulações de fluxo que foram realizadas neste trabalho e um esboço da geometria para um núcleo de argila com $B = 50m$, respectivamente.

Figura 15 - Fluxograma das atividades realizadas no trabalho



Fonte: Autor

Figura 16 - Geometria analisada para uma base de 50m

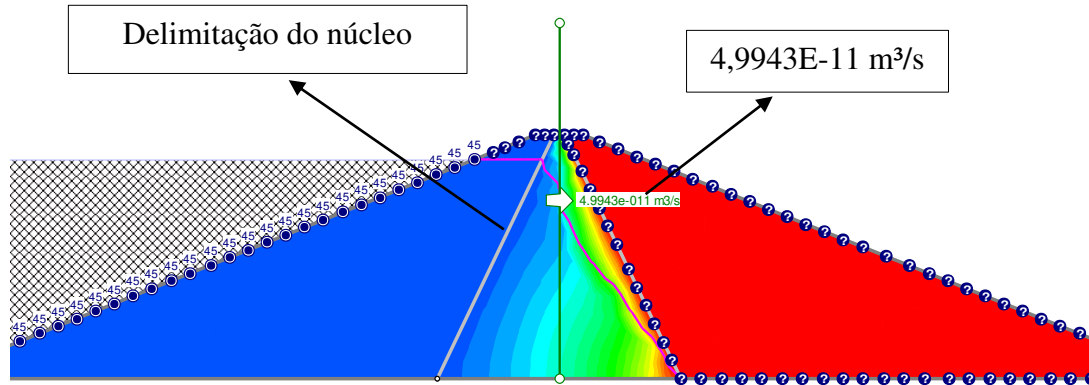


Fonte: Autor

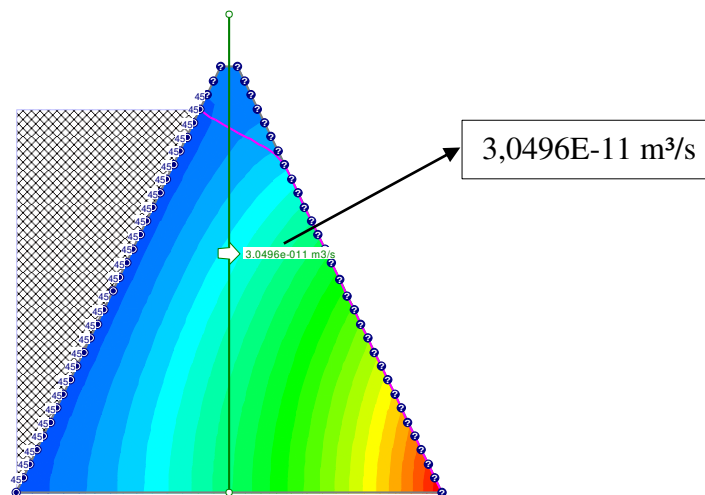
4.5.1 Simulação para uma Barragem com Núcleo de Solo (argila)

Inicialmente, foi determinado o valor da vazão para $B = 50\text{m}$, considerando o valor de k igual a $1,0\text{m/s}$ para o enrocamento, conforme a Tabela 6, e para o núcleo, o valor de $1,0\text{E-}12\text{m/s}$. A Figura 17 mostra os valores de vazões determinadas para uma situação com enrocamento (Figura 17a) e outra sem o enrocamento (Figura 17b), analisando apenas o núcleo. Observando a situação com enrocamento, nota-se que não houve uma perda de carga significativa entre o enrocamento e o núcleo de solo, sendo este um fato já esperado visto que o valor de k do próprio enrocamento é muito maior que o do núcleo de solo. O valor de Q encontrado para as duas situações tem uma variação muito pequena, caindo de $4,9943\text{E-}11\text{m}^3/\text{s}$ para $3,0496\text{E-}11\text{m}^3/\text{s}$, não mudando se quer a sua ordem de grandeza. Deste modo, para as demais análises, adotou-se um perfil sem enrocamento aplicando a condição de contorno diretamente na face do núcleo. O enrocamento pode ser desprezado por não ter função de estanqueidade para a estrutura para o caso analisado. Vale ressaltar que, para os casos avaliados no presente estudo, o objetivo é avaliar a vazão no núcleo. Por esse motivo, essa consideração de desconsiderar o enrocamento torna-se possível. Além disso, possibilita uma maior agilidade de convergência durante o processamento das análises.

Figura 17 - Cálculo de vazões no centro do perfil da barragem



(a) Situação com enrocamento



(b) Situação sem enrocamento

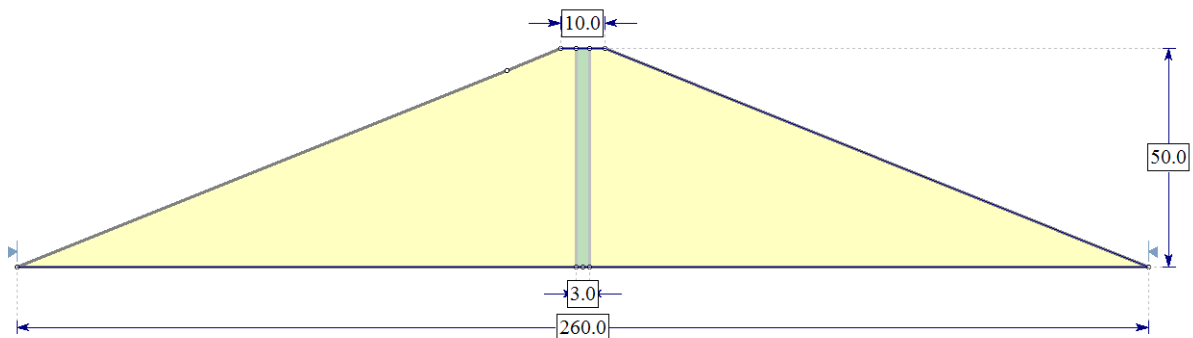
Fonte: Autor

Após determinar e analisar todos os valores de Q encontrados nas simulações para os diferentes valores de B e k , determinou-se a Equação mencionada anteriormente, $Q = k \times f(B)$. Que relaciona o valor da vazão (Q) dependente da largura da base de solo (B) e do coeficiente de permeabilidade do solo (k).

4.5.2 Simulação para uma Barragem com Núcleo de Misturas Asfálticas (Concreto Asfáltico)

Na fase para as MA, foi determinado o valor de Q da forma mencionada anteriormente, através do Slide 6.0. Logo depois, com o uso da Equação definida para o caso do núcleo de solo, utilizou-se como dados de entrada na própria Equação, os valores das vazões para as MA e o valor de k para as argilas comumente utilizadas em núcleo de barragens de terra ($k = 3,0E-09\text{m/s}$, como mostrado na Tabela 6). Feito isso, foi possível encontrar um valor de B que assegurasse uma mesma vazão para uma espessura de MA. A Figura 18 mostra a seção definida para mistura asfáltica com o valor de $e = 3,00\text{m}$.

Figura 18 - Geometria analisada para uma espessura (e) de mistura asfáltica de 3,00 m



Fonte: Autor

4.6 CUSTOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Com o intuito de encontrar os custos monetários na aquisição de argilas e misturas asfálticas, realizou-se consultas no sítio eletrônico do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). As Tabelas 7 e 8 indicam os valores encontrados para argilas e misturas asfálticas, respectivamente. O levantamento dos preços foi direcionado aos nove estados da região nordeste do Brasil: Alagoas – AL; Bahia – BA; Ceará – CE; Maranhão – MA; Paraíba – PB; Pernambuco – PE; Piauí – PI; Rio Grande do Norte – RN e Sergipe – SE. Foram encontrados quatro tipos de argilas e todas foram identificadas de ordem crescente com letras e números A1, A2, A3 e A4:

- Argila expandida, granulometria 2215 em m³ (A1);
- Argila ou barro para aterro/reaterro (com transporte até 10km) em m³ (A2);
- Argila ou barro para aterro/reaterro (retirado na jazida, sem transporte) em m³ (A3);
- Argila, argila vermelha ou argila arenosa (retirada na jazida, sem transporte) em m³ (A4).

Para as misturas asfálticas também foram encontrados quatro tipos de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado à Quente), que atualmente é conhecido por CA (Concreto Asfáltico). Os tipos (CA1, CA2, CA3 e CA4) de CA se dividem em:

- Concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) para pavimentação asfáltica, padrão DNIT, faixa c, com CAP (Cimento Asfáltico derivado do Petróleo) 30/45 - aquisição posto usina, em toneladas (CA1);
- Concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) para pavimentação asfáltica, padrão DNIT, faixa c, com CAP 30/45 – DMT (Distância Média de Transporte) = 10km, em m³ (CA2);
- Concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) para pavimentação asfáltica, padrão DNIT, faixa c, com CAP 50/70 - aquisição posto usina, em m³ (CA3);
- Concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) para pavimentação asfáltica, em m³ (CA4).

Tabela 7: Custo das argilas por estado (R\$)

Estado	Tipos de argilas			
	A1 (m ³)	A2 (m ³)	A3 (m ³)	A4 (m ³)
Alagoas	206,25	29,21	16,84	9,92
Bahia	150,00	21,25	12,25	7,00
Ceará	83,58	11,84	6,82	3,90
Maranhão	150,82	21,36	12,31	7,03
Paraíba	168,75	23,90	13,78	7,87
Pernambuco	253,12	35,85	20,67	11,81
Piauí	150,83	21,37	12,32	7,04
Rio Grande do Norte	150,82	21,36	12,31	7,03
Sergipe	195,22	27,65	15,94	9,11

Fonte: SINAPI

Tabela 8: Custo das misturas asfálticas por estado (R\$)

Estado	Tipos de misturas asfálticas			
	CA1 (T)	CA2 (m ³)	CA3 (m ³)	CA3 (m ³)
Alagoas	209,55	523,32	235,39	586,59
Bahia	244,81	611,38	275,00	685,30
Ceará	160,24	400,17	180,00	448,56
Maranhão	213,65	533,57	240,00	598,08
Paraíba	195,85	489,10	220,00	548,24
Pernambuco	222,56	555,80	250,00	623,00
Piauí	195,85	489,19	220,00	548,24
Rio Grande do Norte	258,17	644,73	290,00	722,68
Sergipe	195,85	489,10	220,00	548,24

Fonte: SINAPI

Após analisar os dados encontrados no SINAPI, decidiu-se realizar um comparativo de custos para a construção de um núcleo com argila do tipo A2 e com mistura asfáltica do tipo CA2, pois ambas são comercializadas por metro cúbico de material e com uma Distância Média de Tráfego (DMT) de 10km. Além disso, os valores considerados foram as médias dos estados. A Tabela 9 apresenta os valores utilizados nas análises de custos.

Tabela 9: Custo médio para o nordeste (R\$)

Material	Média de Custo
A2 (m ³)	23,75
CA2 (m ³)	526,26

Fonte: Autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS PARA O NÚCLEO DE SOLO (ARGILA)

De acordo com as simulações realizadas para os diferentes valores de k e de B (largura da base do núcleo de solo), foi gerada a Tabela 10, que mostra um resumo dos valores encontrados para a vazão na seção transversal no centro do núcleo.

Tabela 10 - Vazão (Q em m^3/s) para combinações de largura (B em m) de base do núcleo e k (m/s)

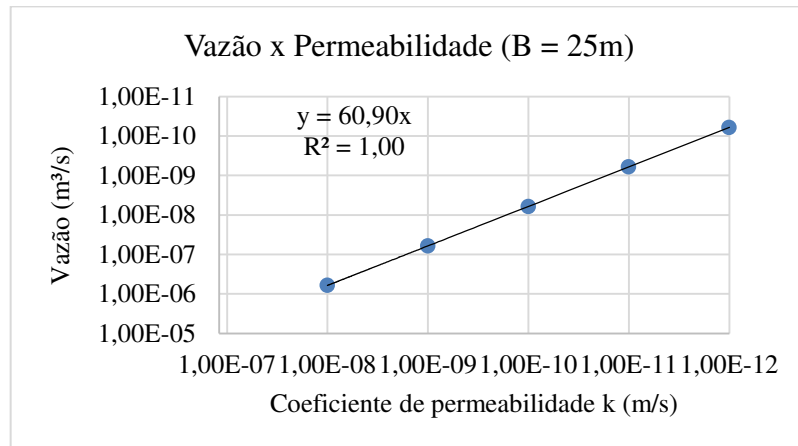
k (m/s)	Vazão em m^3/s para os valores de $B = 0,50H$ até $B = 1,00H$, sendo $H = 50\text{m}$					
	$B = 25\text{m}$	$B = 30\text{m}$	$B = 35\text{m}$	$B = 40\text{m}$	$B = 45\text{m}$	$B = 50\text{m}$
1,00E-12	6,09E-11	5,09E-11	4,37E-11	3,84E-11	3,44E-11	3,06E-11
1,00E-11	6,09E-10	5,09E-10	4,37E-10	3,84E-10	3,44E-10	3,06E-10
1,00E-10	6,09E-09	5,09E-09	4,37E-09	3,84E-09	3,44E-09	3,06E-09
1,00E-09	6,09E-08	5,09E-08	4,37E-08	3,84E-08	3,44E-08	3,06E-08
1,00E-08	6,09E-07	5,09E-07	4,37E-07	3,84E-07	3,44E-07	3,06E-07

Fonte: Autor

Analisando a Tabela 10, mantendo o valor de k constante, nota-se que há uma pequena diminuição (variando de 10% - 16%) da vazão (Q) quando a base de solo (B) é aumentada, conservando a ordem de grandeza para todas as larguras. Por outro lado, para valores de B constante, nota-se um aumento considerável da vazão quando o valor de k aumenta, mudando inclusive a ordem de grandeza, que representa valores dez vezes maiores a cada vazão calculada. Esse comportamento já era esperado, pois de acordo com a Lei de Darcy (Equação 5), a vazão é uma função diretamente proporcional ao valor de k .

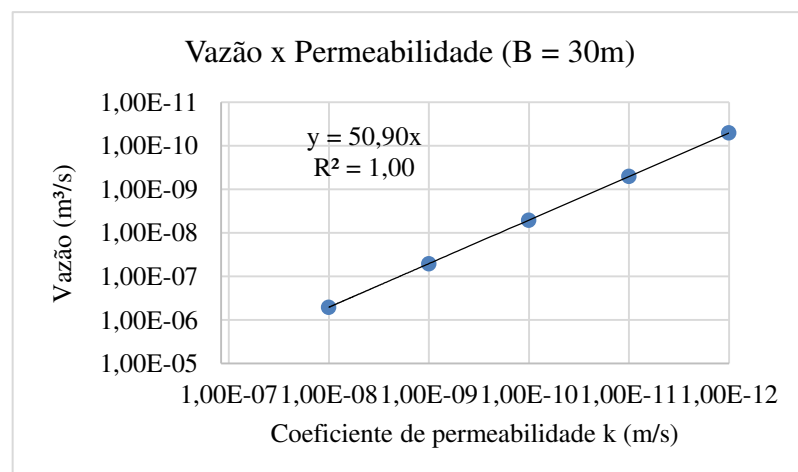
De forma a verificar uma correlação entre Q e k para cada base de solo (B) utilizada na simulação, foram plotados os gráficos das Figuras 19 a 24. Realizando, para todos os casos um ajuste de curva do tipo potência, pois foi o ajuste que ofereceu o melhor R^2 .

Figura 19 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 25m



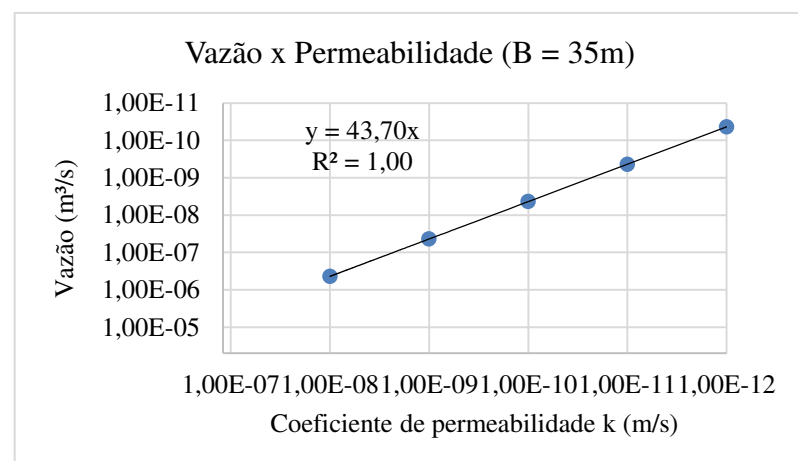
Fonte: Autor

Figura 20 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 30m



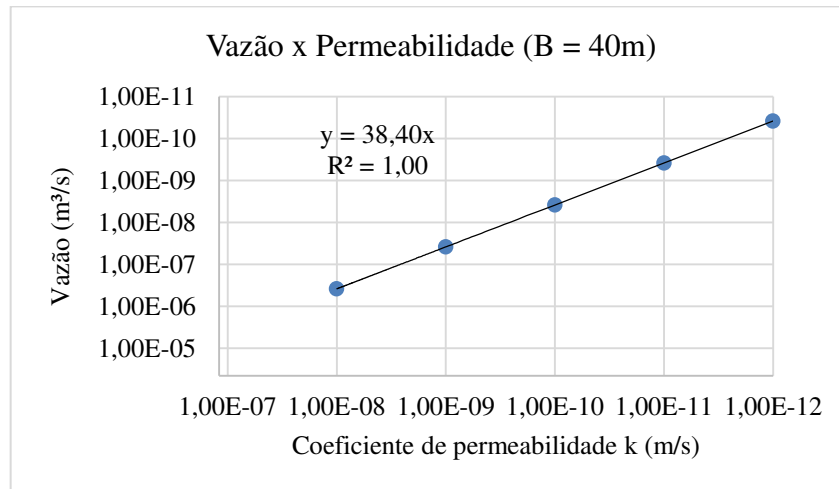
Fonte: Autor

Figura 21 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 35m



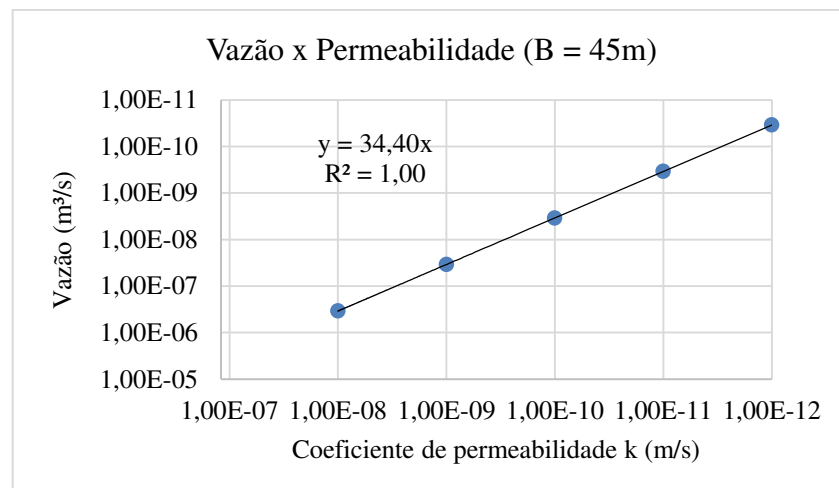
Fonte: Autor

Figura 22 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 40m



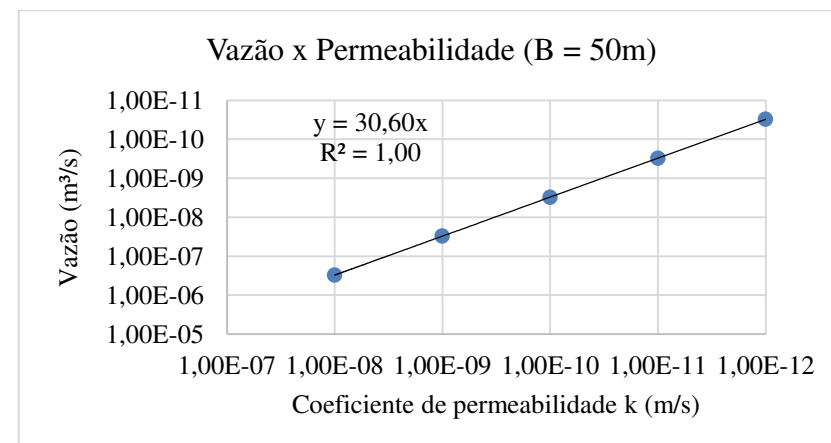
Fonte: Autor

Figura 23 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 45m



Fonte: Autor

Figura 24 - Vazão vs Coeficiente de Permeabilidade pra B = 50m



Fonte: Autor

Ao analisar todos os gráficos, notou-se que existe um comportamento diretamente proporcional entre o Eixo x (k) e o Eixo y (Q). O coeficiente de determinação unitário ($R^2 = 1$) para todas as situações, assegura a condição de linearidade da equação. Logo, pode ser escrita uma formulação matemática para a vazão (Q), conforme a Equação 15.

$$Q = \alpha \times k \quad (15)$$

Onde:

α = Coeficiente Angular variável para cada valor de B avaliado;

De acordo com a Equação 14, a vazão pode ser expressa em função do seu fator de forma, representado pela razão entre o número de canais de fluxo (N_f) e o número de perdas equipotenciais (N_d). As Equações 14 e 15, representam uma solução para o cálculo da vazão. Igualando essas equações, pode-se dizer que o valor de α é equivalente ao produto da carga total (h) pelo fator de forma (f).

$$Q = k \times h \times f = k \times \alpha \rightarrow \alpha = h \times f \quad (16)$$

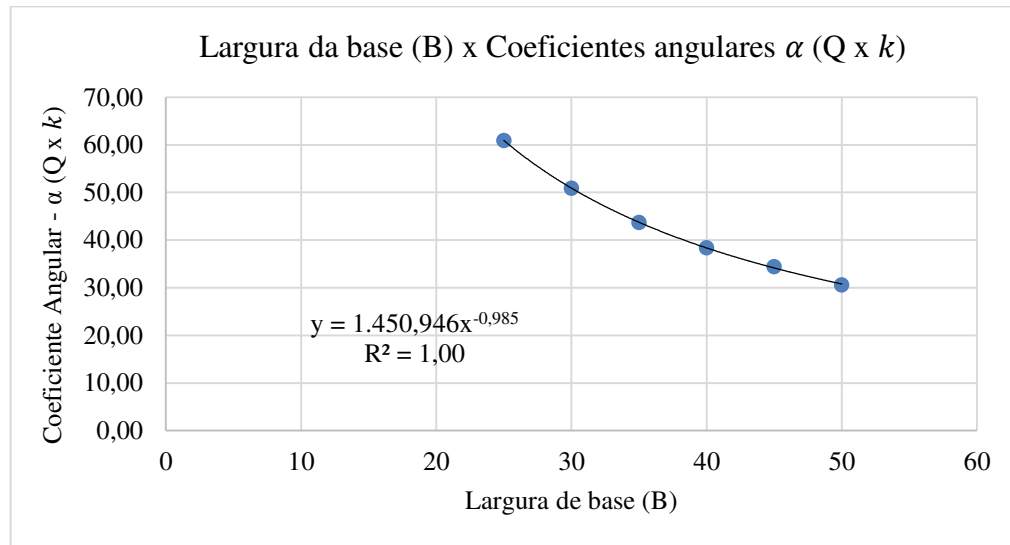
Dando continuidade as análises, pode-se dizer ainda que, os coeficientes angulares dos ajustes das curvas apresentados nas Figuras 19 a 24 podem ser relacionados com as respectivas larguras de base (B) de solo, como mostrado na Tabela 11. A Figura 25 mostra um gráfico plotado com a respectiva relação entre esses valores.

Tabela 11 - Coeficiente Angular α para cada valor de B (m)

B (m)	25	30	35	40	45	50
Coeficiente Angular α	30,60	34,40	38,40	43,70	50,90	60,90

Fonte: Autor

Figura 25 - Relações de base de solo (B) e coeficientes angulares (α)



Fonte: Autor

Analisando a Figura 25, nota-se que o Coeficiente Angular (α), representando pelo Eixo y, é função da largura da base do núcleo (B), e assume valores de acordo com a Equação 17. Esta, também apresentou coeficiente de determinação unitário R^2 igual a 1. Portanto, para o caso analisado e para as faixas de larguras investigadas, considerando a ausência do enrocamento, a Equação 15 pode ser reescrita conforme a Equação 18.

$$\alpha = 1450,946 \cdot B^{-0,985} \quad (17)$$

$$Q = k \cdot 1450,946 \cdot B^{-0,985} \quad (18)$$

A Equação 18 é válida para o caso específico que foi analisado com um valor de perda de carga total $h = 45\text{m}$. Porém, como a vazão também deve ser proporcional a perda de carga (h) disponível, podemos generalizar a fórmula dividindo ambos os lados por h . Onde para o lado depois da igualdade, divide-se por 45m , conforme o caso analisado. Feito isso, a mesma será apresentada de acordo com a Equação 19.

$$\frac{Q}{k \cdot h} = \frac{1450,946}{45} \cdot B^{-0,985} = 32,243 \cdot B^{-0,985} \quad (19)$$

Na Tabela 12, apresentam-se os valores calculados que validam a Equação 19, utilizando os valores encontrados pelas simulações na Tabela 10 com o maior e o menor valor de k .

Tabela 12 - Validação da Equação 19 gerada pelas simulações

Vazão (Q) em m ³ /s para as razões de 0,50H até 1,00H						
	B = 25m	B = 30m	B = 35m	B = 40m	B = 45m	B = 50m
Valor calculado com Slide 6.0, $k = 1,00E-12$	6,09E-11	5,09E-11	4,37E-11	3,84E-11	3,44E-11	3,06E-11
Valor calculado com Equação 19, $k = 1,00E-12$	6,09E-11	5,09E-11	4,37E-11	3,83E-11	3,41E-11	3,08E-11
Valor calculado com Slide 6.0, $k = 1,00E-08$	6,09E-07	5,09E-07	4,37E-07	3,84E-07	3,44E-07	3,06E-07
Valor calculado com Equação 19, $k = 1,00E-08$	6,09E-07	5,09E-07	4,37E-07	3,83E-07	3,41E-07	3,08E-07

Fonte: Autor

Portanto, com a comparação dos resultados, pode-se afirmar que a Equação 19 é válida para um núcleo com forma correspondente ao analisado por este trabalho, ou seja, uma seção trapezoidal simétrica com largura do coroamento do núcleo ($b = 2m$) constante e muito menor que a largura da base (B), e nível de água ocupando 90% da altura total do perfil. Essa Equação, fornece uma estimativa da vazão para barragens de terra e enrocamento com núcleo de solo (argila) semelhante a seção de análise com os valores de k para o enrocamento bem superiores aos do núcleo. Ainda, devido o caso analisado ser comum em obras desse tipo, acredita-se que a Equação 19 seja de utilidade prática em perfis similares.

5.2 RESULTADOS PARA O NÚCLEO DE MISTURAS ASFÁLTICAS (CONCRETO ASFÁLTICO)

De acordo com as simulações realizadas para os diferentes valores de k e de e (espessura do núcleo), foi gerada a Tabela 13, que mostra um resumo dos valores encontrados para a vazão na seção transversal no centro do núcleo.

Tabela 13 - Vazão (Q em m^3/s) para combinações de espessura (e em m) de base do núcleo e coeficiente de permeabilidade (k em m/s)

Autor	Tipo de mistura	k (m/s)	Vazão Q (m^3/s) para cada valor de espessura do núcleo e (m) de acordo com o valor de k					
			$e = 0,50$	$e = 1,00$	$e = 1,50$	$e = 2,00$	$e = 2,50$	$e = 3,00$
FALCÃO (2007)	CA Granito	9,50E-12	2,10E-08	1,04E-08	6,86E-09	5,28E-09	4,17E-09	3,33E-09
FALCÃO (2007)	CA Calcário	1,00E-11	2,21E-08	1,09E-08	7,22E-09	5,55E-09	4,39E-09	3,51E-09
FALCÃO (2007)	CA Micaxisto	2,30E-11	5,09E-08	2,51E-08	1,66E-08	1,28E-08	1,01E-08	8,07E-09

Fonte: Autor

De posse dos resultados da Tabela 12, pode-se observar que para ambos os casos, o valor da vazão sofre uma redução quando a espessura e é aumentada. Essa redução atesta a razão pela qual os valores de e mais utilizados são 0,50m e 1,20m. Devido ao valor da vazão reduzir algo em torno de 50% quando a espessura é aumentada de 0,50m para 1,00m, e logo depois ela começar a reduzir de forma não tão significativa quanto a primeira (20%, 10%, 2% e 1% com o aumento de e , respectivamente). De modo a facilitar o entendimento dessa redução foi criada a Tabela 14, relacionando o aumento de e e o percentual de redução da vazão.

Tabela 14 - Percentual de diminuição da vazão com o aumento da espessura e para as três MA analisadas

	0,5m-1,0m	1,0m-1,5m	1,5m-2,0m	2,0m-2,5m	2,5m-3,0m
Granito	50,68%	33,82%	23,08%	21,04%	20,01%
Calcário	50,68%	33,82%	23,08%	21,04%	20,01%
Micaxisto	50,68%	33,82%	23,08%	21,04%	20,01%

Fonte: Autor

5.3 RESULTADOS PARA OS CUSTOS DOS MATERIAIS

Com uso da Equação 19, isolando a variável B , pode-se determinar a largura da base de argila (B) necessária para garantir uma mesma vazão de MA. Para isso, utilizou-se como dados de entrada na própria Equação, o valor de k igual a $3,0E-09\text{m/s}$ (Coeficiente de Permeabilidade para argilas, Tabela 6) e o valor de Q referente a cada tipo de MA e suas espessuras, obtidos na Tabela 12. Os resultados de B para uma mesma vazão de e podem ser encontrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Dimensões de base de núcleo (B) para cada espessura de MA (e) de igual vazão

Mistura Asfáltica		k (m/s)	e (m)	Q (m³/s)	B (m)
FALCÃO (2007)	CA-Granito	9,50E-12	0,50	2,10E-08	224,59
			1,00	1,04E-08	460,32
			1,50	6,86E-09	699,98
			2,00	5,28E-09	913,70
			2,50	4,17E-09	1161,32
			3,00	3,33E-09	1456,75
FALCÃO (2007)	CA-Calcário	1,00E-11	0,50	2,21E-08	213,19
			1,00	1,09E-08	436,95
			1,50	7,22E-09	664,46
			2,00	5,55E-09	867,34
			2,50	4,39E-09	1102,39
			3,00	3,51E-09	1382,84
FALCÃO (2007)	CA-Micaxisto	2,30E-11	0,50	5,09E-08	91,52
			1,00	2,51E-08	187,59
			1,50	1,66E-08	285,25
			2,00	1,28E-08	372,34
			2,50	1,01E-08	473,25
			3,00	8,07E-09	593,65

Fonte: Autor

Para todo efeito, a Tabela 15 pode ser lida da seguinte maneira: Uma mistura asfáltica do tipo CA-Granito com valor de $k = 9,50E-12\text{m/s}$ e uma espessura $e = 0,50\text{m}$ garante uma vazão $Q = 2,10E-08 \text{ m}^3/\text{s}$. Contudo, para garantir essa mesma vazão Q , um núcleo de argila com o valor de $k = 3,0E-09\text{m/s}$ e largura do coroamento do próprio núcleo $b = 2\text{m}$, deveria apresentar uma largura de base $B = 224,59\text{m}$.

A Tabela 16 apresenta os valores de volume por metro linear para cada espessura e de MA e cada largura da base do núcleo B de argila. Além disso, a mesma tabela também apresenta o custo gerado para o uso de cada um dos materiais.

Tabela 16 - Custos de MA e Argila para uma mesma vazão

Mistura Asfáltica	k (m/s)	e (m)	B (m)	Volume MA (m ³ /m)	Volume Argila (m ³ /m)	Custo (R\$)	
						MA (R\$=526,26)	Argila (R\$23,75)
FALCÃO (2007)	CA- Granito	9,50E-12	0,50	224,59	25,00	5.664,70	13.156,50
			1,00	460,32	50,00	11.558,06	26.313,00
			1,50	699,98	75,00	17.549,41	39.469,50
			2,00	913,70	100,00	22.892,43	52.626,00
			2,50	1161,32	125,00	29.082,96	65.782,50
			3,00	1456,75	150,00	36.468,72	78.939,00
FALCÃO (2007)	CA- Calcário	1,00E-11	0,50	213,19	25,00	5.379,65	13.156,50
			1,00	436,95	50,00	10.973,74	26.313,00
			1,50	664,46	75,00	16.661,42	39.469,50
			2,00	867,34	100,00	21.733,49	52.626,00
			2,50	1102,39	125,00	27.609,77	65.782,50
			3,00	1382,84	150,00	34.620,98	78.939,00
FALCÃO (2007)	CA- Micaxisto	2,30E-11	0,50	91,52	25,00	2.338,05	13.156,50
			1,00	187,59	50,00	4.739,76	26.313,00
			1,50	285,25	75,00	7.181,29	39.469,50
			2,00	372,34	100,00	9.358,47	52.626,00
			2,50	473,25	125,00	11.881,25	65.782,50
			3,00	593,65	150,00	14.891,27	78.939,00

Fonte: Autor

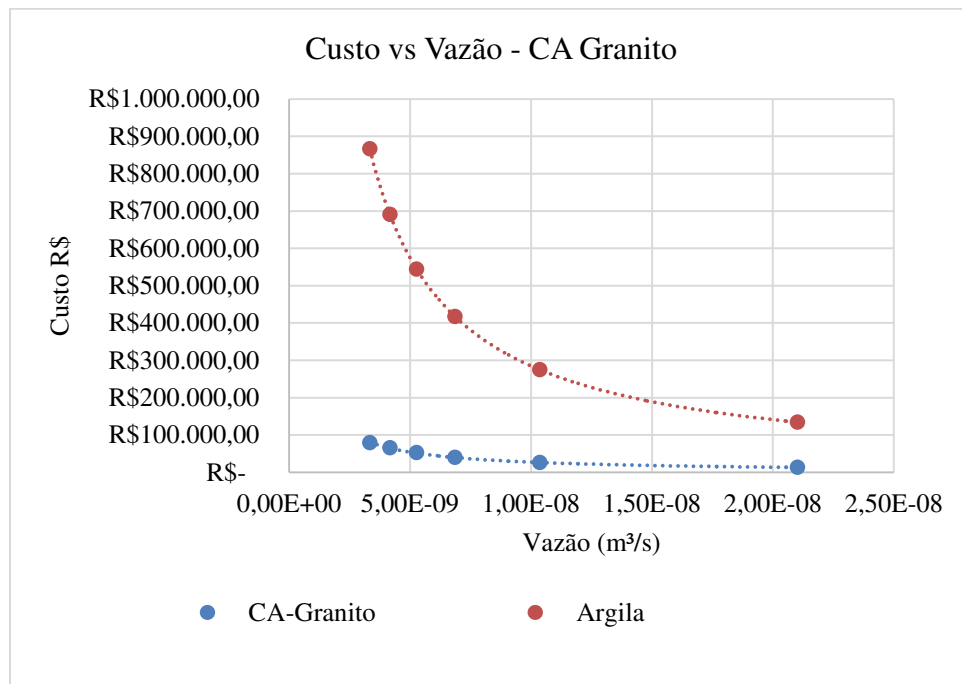
Foi feita uma simplificação dos dados obtidos, gerando a Tabela 17, que mostra um resumo dos valores de vazão e custos de acordo com cada material. Logo após, foram plotados nas Figuras 26, 27 e 28 os gráficos referentes aos custos de cada tipo de MA comparando-as com as argilas.

Tabela 17 - Custos de cada MA e da argila para uma mesma vazão

	Q (m³/s)	Custo	
		MA (R\$)	Argila (R\$)
CA-Granito	2,10E-08	13.156,50	134.536,65
	1,04E-08	26.313,00	274.503,88
	6,86E-09	39.469,50	416.798,45
	5,28E-09	52.626,00	543.695,32
	4,17E-09	65.782,50	690.720,21
	3,33E-09	78.939,00	866.132,10
CA-Calcário	2,21E-08	13.156,50	127.766,61
	1,09E-08	26.313,00	260.626,43
	7,22E-09	39.469,50	395.708,74
	5,55E-09	52.626,00	516.170,49
	4,39E-09	65.782,50	655.732,10
	3,51E-09	78.939,00	822.248,28
CA-Micaxisto	5,09E-08	13.156,50	55.528,69
	2,51E-08	26.313,00	112.569,39
	1,66E-08	39.469,50	170.555,60
	1,28E-08	52.626,00	222.263,71
	1,01E-08	65.782,50	282.179,61
	8,07E-09	78.939,00	353.667,56

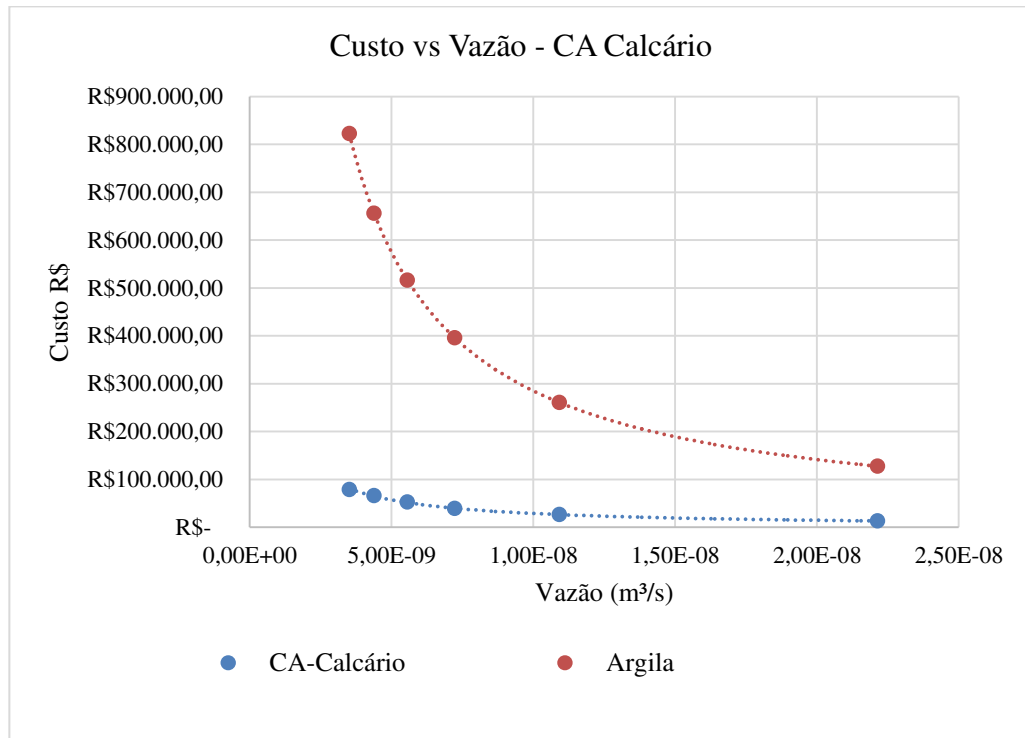
Fonte: Autor

Figura 26 - Relação de Custo vs Vazão para argila e MA – CA Granito



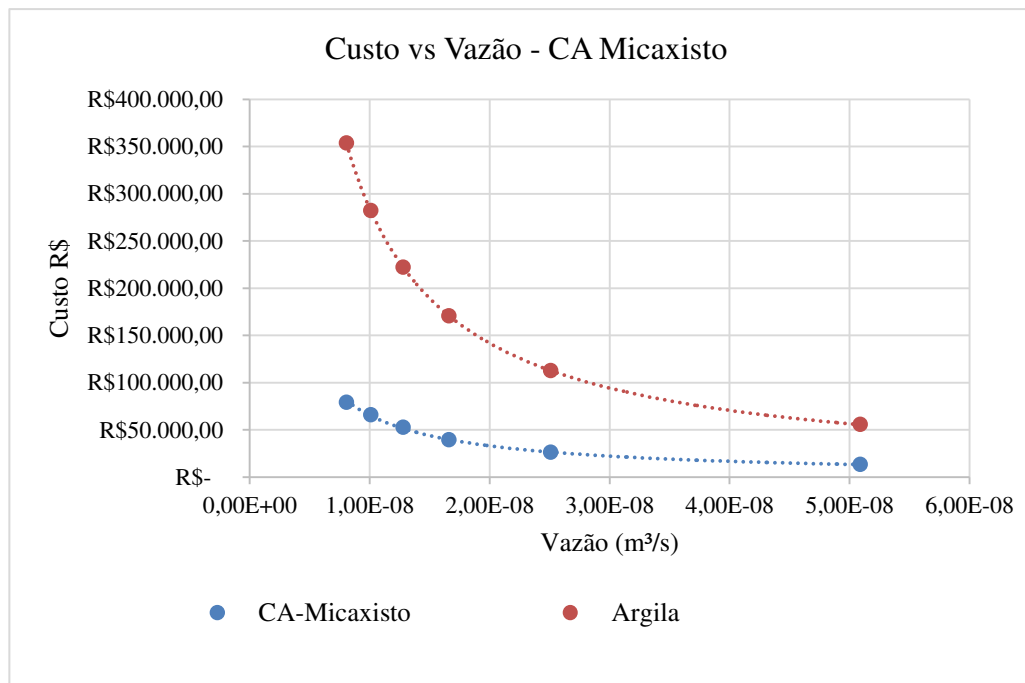
Fonte: Autor

Figura 27 - Relação de Custo vs Vazão para argila e MA – CA Calcário



Fonte: Autor

Figura 28 - Relação de Custo vs Vazão para argila e MA – CA Micaxisto



Fonte: Autor

Ao analisar as Figuras 26, 27 e 28, nota-se que há um custo bem mais elevado na aquisição de argilas para uma mesma vazão. Isso acontece pelo fato de que o volume necessário desse material ser bem maior do que o de MA. Ainda, quanto menor o valor da vazão que se deseja obter, mais oneroso será o valor da argila.

Outra observação importante é que, quanto maior o valor da vazão, mais próximos os custos se apresentam. Isso acontece em razão da vazão (Q) ser inversamente proporcional ao valor de B (como mostrado na Equação 19). Logo, quando a vazão aumenta, o valor de B diminui, precisando assim de um menor volume de material (diminuição do custo). Apesar disso, essa situação não é comumente estudada, visto que em projetos de barragens não se encontram valores de vazão elevados atravessando o núcleo.

Vale lembrar que, a maior parte dos valores encontrados para B não poderia ser executado para a situação hipotética analisada, visto que esse valor ultrapassou a largura total da base, tendo assim, que mudar a geometria do perfil.

6. CONCLUSÃO

O trabalho apresentou uma proposta de estudo da viabilidade do uso de misturas asfálticas como alternativa a argila como núcleo de barragens de terra. Foram realizadas simulações numéricas através do *software* Slide 6.0 com o objetivo de calcular a vazão em uma seção transversal no centro do núcleo da barragem. Estas simulações mostraram que, para garantir uma mesma vazão entre núcleo de argila e o núcleo de MA, seria necessário um volume de material bem maior de argila. Com isso, o uso de MA é tecnicamente viável, pois o material apresenta permeabilidade que garante a estanqueidade do núcleo. Vale lembrar que, todos os três tipos de CA (Granito, Calcário e Micaxisto) utilizados nesta análise mostraram eficiência quando a sua permeabilidade. Outro fator interessante de observar é que, para as espessuras (0,50m e 1,00m) de MA comumente utilizadas em barragens de terra, nenhum dos três tipos de CA necessitaria de um valor de B de argila, dentro dos valores que é utilizado na literatura (0,50H – 1,00H). Ou seja, para o caso analisado, não ficariam entre 25m e 50m.

Com relação a análise de custos, foi realizada uma avaliação econômica relacionando a quantidade de material (volume por metro linear) com o seu valor de aquisição. Observou-se que, mesmo o preço do metro cúbico de argila sendo inferior ao de MA, seria bem mais oneroso optar pela utilização da mesma. Isso é explicado no grande valor de volume necessário para assegurar as propriedades oferecidas pelas MA.

Diante do que foi avaliado neste trabalho, pode-se afirmar que as MA se apresentam como uma solução técnica e economicamente viável quando analisada em relação a vazão. Porém, também é necessário que se faça outras análises, como as de estabilidade da estrutura e inserção de elementos de transição que diminuem a energia gerada pela velocidade da água evitando o carreamento das partículas. Além disso, a perspectiva e visibilidade do uso dessas misturas é muito grande, tendo em vista que em outros países já se tem obras desse tipo há alguns anos.

Em conformidade com as análises realizadas durante esse trabalho, foram desenvolvidas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a viabilidade do uso de MA como substituto à argila verificando a estabilidade da estrutura;
- Estudar a influência do enrocamento na vazão de uma barragem, variando os valores de k para o mesmo;
- Comparar a mesma geometria de uma barragem utilizando núcleo e face de MA;

- Comparar as vazões encontradas no trabalho com algumas encontradas em um caso real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, A.P.; HERNANDEZ, H. M.; COLMANATTI, J. P. **Apostila de Barragens**. Departamento de Engenharia Civil & Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Distrito Federal, Brasília. 2003.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: Formação Básica para Engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras Asfaltos, 2008. 504 p.

CAPUTO, Homero Pinto. **MECÂNICA DOS SOLOS E SUAS APLICAÇÕES: FUNDAMENTOS**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 234 p.

CHAVES, F.J. (2010) **Estudo de Misturas de Areia Asfalto a Frio em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego no Estado do Ceará – Contribuição ao Método de Dosagem**. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

CHIOSSI, Nivaldo José. **Geologia de engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 424 p.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352 p.

CRUZ, Paulo Teixeira. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 648 p.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução All Tasks; Revisão Técnica Pérsio Leister de Almeida Barros. 6ª Edição, São Paulo. Saraiva. 2007.

FALCÃO, Paulo Roberto Farias. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DE CONCRETOS ASFÁLTICOS PARA APLICAÇÃO EM BARRAGENS**. 2007. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

FERREIRA, Wellington Lorrán Gaia. **ANÁLISE DO FLUXO D'ÁGUA EM REVESTIMENTOS COM DIFERENTES PERMEABILIDADES**. 2015. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

FERREIRA, Wellington Lorrán Gaia. **AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM DIFERENTES GRANULOMETRIAS**. 2013. 81 f. Monografia - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

NASCIMENTO, R.R. (2005) **Utilização de Agregados de Argila Calcinada em Pavimentação: uma Alternativa para o Estado do Acre**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

O'FLAHERTY, A.M. (2002) **Highways – The Location, Design, Construction and Maintenance of Road Pavements**. 4ª Edição. Design and Construction of Hot-Mix Bituminous Surfacing and Roadbases - Capítulo 12. Oxford, Butterworth Heinemann.

OLIVEIRA, C.G.M. (2003) **Estudos de Propriedades Mecânicas e Hidráulicas do Concreto Asfáltico Drenante**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Distrito Federal, DF.

OLIVEIRA, Desireé Alves de. **ANÁLISE DO FLUXO D'ÁGUA NA BARRAGEM ENGENHEIRO ARMANDO RIBEIRO GONÇALVES – AÇU/RN**. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

MASSAD, Façal. **Obras de Terra: curso básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

SOUZA NETO, Francisco Alberto David Duarte de. **CONCRETO ASFÁLTICO PARA NÚCLEO DE BARRAGEM - CASO DA UHE JIRAU, RO**. 2013. 140 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SOUZA, S.A. (2008) **Avaliação da Capacidade de Escoamento da Água em Mistura Asfáltica Drenante: Proposta de Ensaio de Laboratório**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.