



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

ALISSON DO NASCIMENTO LIMA

**OTIMIZAÇÃO DA IMPERMEABILIDADE DO NÚCLEO DE UMA
BARRAGEM DE TERRA COM BASE NO COEFICIENTE η/L_{IV}**

CAMPINA GRANDE - PB

2019

ALISSON DO NASCIMENTO LIMA

**OTIMIZAÇÃO DA IMPERMEABILIDADE DO NÚCLEO DE UMA
BARRAGEM DE TERRA COM BASE NO COEFICIENTE η/L_{IV}**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG,
como parte dos requisitos necessários para
encerramento do componente curricular e conclusão da
graduação no curso de Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Dra. Carina Silvani

Coorientadora: Msc. Mozara Benetti

CAMPINA GRANDE – PB

2019

É concedida à Universidade Federal de Campina Grande permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Alisson do Nascimento Lima

Lima, Alisson do Nascimento.

Otimização da impermeabilidade do núcleo de uma barragem de terra com base no coeficiente η/L_{IV} . / Alisson do Nascimento Lima.

58 p. : il.

Campina Grande, 2019.

Trabalho de Conclusão de Curso. Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

1. Obras de terra – melhoramento de solo. Universidade Federal de Campina Grande.

Aos meus pais, Gertudes e Antônio (*in memoriam*), aos meus irmãos e a todos meus amigos que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte da minha saúde espiritual. Também gostaria de expressar meus agradecimentos as seguintes pessoas e instituições.

Agradeço imensamente à minha mãe Maria Gertudes, que me educou em casa, na escola, que sempre esteve comigo e confiou. Mulher que fez e faz tudo por seus filhos. Meu maior orgulho!

Ao meu pai Antônio *in memoriam*, que tão cedo nos deixou, deixando sempre uma lacuna de convivência.

Aos meus irmãos, que contribuíram e contribuem para a minha formação como pessoa. À minha irmã, Bela, que há 5 anos convivemos cotidianamente, dividindo apartamento, somando os estresses e compartilhando risadas.

À minha orientadora Carina, que sempre esteve a disposição para qualquer coisa, que sempre trata a todos com empatia, e tenta fazer o seu melhor individual e no coletivo. Que você continue essa carreira de docente espetacular, e que mais pessoas se espelhem no seu exemplo de ser humano.

À minha coorientadora Mozara, por disponibilizar seu tempo e conselhos. Além dos dados utilizados como base da minha pesquisa.

Aos meus amigos, que são presentes do curso, Ingridy, Jessy e Breno, que sempre estiveram comigo desde o primeiro projeto até o TCC, sou muito grato pelo crescimento mútuo que nós compartilhamos.

Aos meus amigos 4ever and ever, que sempre estão por perto, e são ótimos alívios cômicos da vida.

Aos meus amigos da rota Queimadas-UFCG, que sempre me privilegiaram com ótimas companhias e risadas na nossa hora do café e no tempo no ônibus.

Agradeço a UFCG e aos mestres que compõem o curso de Engenharia Civil, que em maioria sempre estiveram dispostos a cumprir suas funções com excelência e passar ao máximo de conhecimento.

RESUMO

A necessidade de reservatórios de água para os usos múltiplos, como as barragens de terra, é prática comum no Brasil. A contenção da água feita por este tipo de obra de terra, deve minimizar a percolação de água pelo maciço, afim de garantir o volume represado e a segurança da obra. Diante deste contexto, a presente pesquisa analisou a influência da inserção de um núcleo, com solo melhorado, na quantidade de água percolada através do maciço de uma barragem de terra zoneada. A análise do fluxo deu-se através do SEEP/W (software baseado no método dos elementos finitos) para um maciço composto por 75% de solo residual de arenito Botucatu e 25% resíduo de britagem do basalto com peso específico aparente seco de 16, 17,2 e 18,5 kN/m³. Dotado de núcleo trapezoidal, com base menor de 8 metros e base maior variável: 20, 45 e 70 metros e com as mesmas variações de peso específico do maciço, com adições de 5, 7 e 9% de cal. Com os resultados de vazão para cada simulação, obteve-se que o teor de cal aplicado não tem influência direta na redução da percolação, mas que o peso específico aparente seco do núcleo tem papel fundamental neste fenômeno. Com a análise da razão porosidade/teor volumétrico de cal ($\eta/L_{iv}^{0,12}$), obteve-se que quanto maior a porosidade do material maior será a percolação e menor será o efeito do agente cimentante no núcleo. Pode-se ajustar para cada tamanho de núcleo uma curva única relacionando a vazão percolada com $\eta/L_{iv}^{0,12}$. Assim a aplicabilidade do coeficiente η/L_{iv} mostra-se eficiente na otimização do núcleo no que diz respeito a otimização do núcleo em forma, teor de material cimentante e da porosidade do material, todos em função de uma vazão máxima de percolação adotada.

Palavras-chave: Barragens de terra; núcleo; cal; porosidade.

ABSTRACT

The need to reserve water for multiple uses, using earth dams, is common practice in Brazil. Containment of water by the Embankment must reduce water outlets by the downstream slope, in order to guarantee the dammed volume and the work's safety. Thus, the present research analyzed the influence the insertion of a nucleus, with improved soil, in the water's amount percolated through the mass of a zoned earth dam. A flow analysis was performed using SEEP/W (finite element based software) for a composite of 75% Botucatu sandstone residual soil and 25% dry weight basalt crushing residue of 16.0, 17.2 and 18.5 kN/m³. It has a trapezoidal nucleus with a base smaller than 8 meters and the largest base variable: 20, 45 and 70 meters and with the following mass-specific weight variables, with lime's additions of 5, 7 and 9%. With the leakage results for each simulation, the applied calibration content has no direct influence on the percolation reduction, but the apparent dry weight in the paper nucleus in this phenomenon. With an analysis of the porosity/lime ratio ($\eta/L_{iv}^{0,12}$), the use of the higher the porosity of the material, the greater the percolation and the lower the effect of the cementing agent on the nucleus. A unique curve related to $\eta/L_{iv}^{0,12}$ percolated leakage can be adjusted for each nucleus size. Thus the applicability of the η/L_{iv} coefficient proves to be efficient in optimizing the core with regard to the optimization of the shaped core, cementitious material content and material porosity, all as a function of the maximum percolation flow rate adopted.

Key words: Earth dams; nucleus; lime; porosity.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Permeâmetro de carga constante. Lei de Darcy. | 4 |
| Figura 2: Canais de fluxo e canais equipotenciais..... | 8 |
| Figura 3: Rede de fluxo em uma estaca prancha. | 8 |
| Figura 4: Exemplo de barragem de seção Zoneada, Barragem de São Simão, Brasil..... | 12 |
| Figura 5: Relação entre Condutividade Hidráulica, Teor de Água e Energia de Compactação. | 15 |
| Figura 6: Curva granulométrica dos materiais. | 20 |
| Figura 7: Composição média das cales brasileiras | 21 |
| Figura 8: Pesos específicos aparente secos referentes aos dados de Benetti (2015) | 23 |
| Figura 9: Núcleo com base de 20 m | 24 |
| Figura 10: Núcleo com base de 45 m | 24 |
| Figura 11: Núcleo com base de 70 m | 24 |
| Figura 12: Seção transversal da barragem a ser analisada, dimensões em metros..... | 25 |
| Figura 13: Exemplo de uma malha de elementos finitos..... | 26 |
| Figura 14: Seção que quantifica a vazão que por ela atravessa..... | 26 |
| Figura 15: Influência do teor de cal, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ | 30 |
| Figura 16: Influência do peso específico aparente seco, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_d = 16 \text{ kN /m}^3$ | 28 |
| Figura 17: Influência do teor de cal, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_d = 17,2 \text{ kN/m}^3$ | 29 |
| Figura 18: Influência do peso específico aparente seco, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_d = 17,2 \text{ kN/m}^3$ | 30 |
| Figura 19: Influência do teor de cal, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$ | 31 |
| Figura 20: Influência do peso específico aparente seco, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$ | 32 |
| Figura 21: Vazão percolada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL, para uma maciço de $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ | 33 |
| Figura 22: Vazão percolada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL, para uma maciço de $\gamma_d = 17,2 \text{ kN/m}^3$ | 33 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23: Vazão percolada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL, para uma maciço de $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$ | 34 |
| Figura 24: Influência da área externa ao núcleo na vazão..... | 35 |

LISTA DE TABELAS E QUADROS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos sedimentares em m/s... | 6 |
| Tabela 2: Propriedades do Solo Residual Arenito Botucatu e do Resíduo de Britagem do Basalto | 21 |
| Tabela 3: Dados de condutividade hidráulica em função dos teores de cal e peso específico aparente seco..... | 22 |
| Quadro 1: Variáveis fixadas | 27 |
| Quadro 2: Variáveis controláveis | 28 |
| Quadro 3: Variáveis respostas | 28 |

SUMÁRIO

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. OBJETIVO GERAL..... | 2 |
| 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1. FLUXO UNIDIMENSIONAL..... | 4 |
| 2.2. FLUXO BIDIMENSIONAL | 7 |
| 2.1 Cálculo do fluxo bidimensional por elementos finitos..... | 10 |
| 2.3. FLUXO EM BARRAGENS DE TERRA | 11 |
| 2.4. PERMEABILIDADE EM SOLOS ESTABILIZADOS QUIMICAMENTE..... | 14 |
| 2.5. INFLUÊNCIA DA RAZÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE ADITIVO . | 19 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 20 |
| 3.1. MATERIAIS | 20 |
| 3.1.1. Solo..... | 20 |
| 3.1.2. Resíduo | 20 |
| 3.1.3. Cal..... | 21 |
| 3.1.4. Mistura Solo-Resíduo-Cal..... | 22 |
| 3.2. MÉTODOS..... | 23 |
| 3.2.1. Barragem analisada..... | 24 |
| 3.2.2. Análise de percolação | 25 |
| 3.2.3. Variáveis pesquisadas | 26 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 29 |
| 4.1 MACIÇO COM O PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO DE 16 kN/m ³ | 29 |
| 4.2 MACIÇO COM PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO DE 17,2 kN/m ³ | 28 |
| 4.2 MACIÇO COM PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO DE 18,5 kN/m ³ | 30 |
| 4.3. INFLUÊNCIA DA RAZÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE ADITIVO, NA PERCOLAÇÃO. | 32 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 36 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 37 |
| APÊNDICE A | 42 |

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de reserva de água para os usos múltiplos como: abastecimento, geração de energia e reserva, conduz a necessidade da ciência se mostrar eficiente no desenvolvimento de tecnologias para controlar os elementos naturais e assim satisfazer as necessidades geradas pelo desenvolvimento econômico e social.

Uma barragem de terra independente da sua finalidade deve satisfazer seu propósito como barramento, gerar acúmulo de água de forma segura àqueles situados a jusante da obra. A contenção da água feita pelo barramento deve minimizar as percolações pelo maciço, de modo que as vazões através do corpo da barragem sejam mínimas, a fim de garantir o volume represado e a segurança da obra. A percolação de água através do corpo e fundação de barragens de terra pode levar a perdas de água inaceitáveis em climas áridos, devido ao caráter de escassez deste recurso, além de causar problemas durante a construção e podendo ter efeitos desestabilizadores na barragem de terra (SOLEYMANI; AKHTARPUR, 2011).

A antecipação e previsão de problemas em barragens de terra começam pela investigação geotécnica local e do material a ser utilizado. De forma que a verificar se o solo a ser utilizado apresenta parâmetros de resistência, deformação e permeabilidade satisfatórios a viabilidade do projeto. Fato é que, dependendo da região e localização da obra, o material presente na região pode não propiciar as características desejáveis. Logo, necessita-se de um processo de tomada de decisão do projetista em buscar um material que satisfaça as condições de projeto, podendo implicar elevados custos de transporte de material; utilizar técnicas de melhoramento de parâmetros do solo, a fim de conduzir o solo da região para uma melhor condição.

Por vezes, é verificado que o melhoramento do solo é a escolha mais econômica. Visto que pode se utilizar técnicas simples ou materiais que não tenham grande impacto econômico no custo final da obra. No tratamento de solos, pode-se utilizar materiais aglomerantes (como a cal e o cimento), assim como resíduos industriais, além da aplicação de geossintéticos. Estes componentes, quando adicionados ao solo, irão ampliar ou suprimir propriedades. Para que assim se possa chegar a um material com características que melhor se adequem a finalidade proposta de compor um barramento.

No tipo de obra em questão, barragens de terra, um fator preponderante para o uso de um solo é que este apresente baixo coeficiente de condutividade hidráulica. Isto é, se este irá

satisfazer a proposição de promover uma estanqueidade à água, satisfatória quando aplicado ao maciço. Com isso, diversos estudos (BENETTI, 2015; IBEIRO, 2016; LOCH 2019; ARAUJO, 2019) analisam a inserção de materiais aglomerantes que venham a contribuir com a redução do parâmetro de condutividade hidráulica, quando aplicado materiais que formem ligações junto às partículas de solo, reduzindo a percolação através da massa de solo.

Dentre os materiais mais usados para o processo de melhoramento de solo está a cal. Usualmente esta é aplicada a solos com função de melhoramento de resistência, se dosado de forma a obter-se reações pozolânicas, mas também associa-se a uma redução da permeabilidade deste material. Segundo Azevêdo (2010) as reações pozolânicas transformam o solo-cal em um material com coesão, no entanto, o solo-cal não é um material impermeável. Mas sim um material que sofre menos com o efeito erosivo da água, pois a passagem dela entre os poros após a cimentação pozolânica se dá de forma lenta.

Nesse contexto, foi analisado a influência, como quantificação em vazão, de um solo residual tratado com cal e resíduo da britagem do Basalto, aplicado em forma de um núcleo cimentado a uma barragem de terra, para controle da percolação utilizando o programa SEEP/W.

1.1. OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa objetiva fazer a análise da influência da inserção de um núcleo cimentado, no volume de água percolado através de um maciço de uma barragem de terra.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com o intuito de verificar a funcionalidade do tratamento de solo, através das vazões a jusante avalia-se, ainda, fatores como:

- Investigar as variações da quantidade de volume percolado em uma barragem de terra, quando ocorre a variação do teor de cal do núcleo estabilizado.
- Avaliar a interdependência entre peso específico do núcleo estabilizado com cal e a vazão percolada por uma barragem terra.
- Investigar a influência da geometria do núcleo estabilizado com cal na quantificação de percolação.
- Avaliar a aplicabilidade do coeficiente η/L_{iv} na otimização do núcleo de uma barragem de terra.

- Avaliar a influência do peso específico aparente seco da área externa ao núcleo

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FLUXO UNIDIMENSIONAL

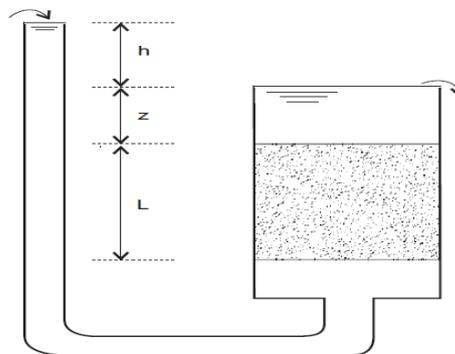
Elemento base da engenharia civil, o solo é constituído por um conjunto de partículas (grãos) com uma fração líquida e ar nos espaços intermediários (PINTO, 2006). A soma dos termos fração líquida e ar citados correspondem ao volume de vazios. Sendo este grande influenciador do comportamento mecânico e físico do material, também influenciando na análise da percolação (fluxo) de água no solo.

A análise do fluxo de água em obras de terra é, em termos gerais, função da permeabilidade do maciço. De forma ampla na literatura científica há-se o entendimento de permeabilidade como uma propriedade que o solo apresenta de permitir a percolação da água através dele. A quantificação de tal propriedade indica o grau de permeabilidade expresso numericamente pelo "coeficiente de condutividade hidráulica".

O estudo de percolação da água nos solos é fundamental para solução de diversos problemas práticos de engenharia como: estimativa de vazões através de maciços ou em escavações, a análise e previsão de recalques, e os estudos de estabilidade. Na estabilidade verifica-se que a percolação de água tem influência na pressão neutra, que por sua vez influencia a tensão efetiva, aspecto este que caracteriza resistência do solo.

A quantificação do parâmetro de permeabilidade se dá pela lei de Darcy. O titular a esta em 1850 verificou experimentalmente como os fatores geométricos, ilustrados na Figura 1, influenciavam a vazão da água em uma areia (PINTO, 2006).

Figura 1: Permeâmetro de carga constante. Lei de Darcy.



Fonte: Pinto (2006).

Darcy ainda fez as seguintes simplificações, para fundamentação de seu modelo: considera o solo como uma estrutura rígida; não há carreamento das partículas; e o fluxo ocorre

em regime laminar de escoamento e de forma unidirecional. Expressando a sua análise na Equação 1:

$$Q = k \frac{h}{L} A \quad (1)$$

Onde: Q= vazão.

A= área do permeâmetro

k= coeficiente de permeabilidade

h= carga que dissipa na percolação

L= distância a qual a carga se dissipa

Diante da Equação 1 ainda é possível que se faça o seu desenvolvimento, fazendo a razão entre vazão e área, resultando em termos de velocidade, como vê-se na Equação (2). Esta, é chamada de velocidade de descarga (v); que indica a quantidade de água fluindo em unidade de tempo através de uma unidade de área da seção transversal bruta de uma amostra de solo saturado em ângulos retos em relação à direção do fluxo (DAS, 2014).

$$v = k i \quad (2)$$

O gradiente hidráulico (i) oriundo da razão carga dissipada (h) pela distância (L), como sendo este um parâmetro adimensional. Assim pela equação verifica-se que o coeficiente de permeabilidade indica velocidade de percolação, para um gradiente igual a 1, logo sua unidade é expressa no Sistema Internacional (SI) em metros por segundo (m/s) (PINTO, 2006).

A análise do experimento de Darcy feito com a areia em um permeâmetro de carga constante, também é feito para solos classificados como argilas, utilizando variáveis características. Estas levam em conta o tempo de percolação da água na amostra como parâmetro direto, visto que as argilas de um modo geral tendem a ter uma velocidade de percolação muito menor que as areias. Além do tempo e das variáveis já descritas no ensaio de carga constante, a área de alimentação do ensaio também tem influência no conjunto, visto que a vazão na bureta de entrada é a mesma na saída (PINTO, 2006). Logo, o permeâmetro de carga variável tem como resposta o coeficiente de permeabilidade para argilas com mostra a Equação 3:

$$k = 2,3 \frac{aL}{At} \log \frac{h_i}{h_f} \quad (3)$$

Onde: a = área da bureta onde há a entrada de água

h_i = altura inicial da água na entrada

h_f = altura final da água na entrada

t = tempo decorrido entre a altura inicial e final.

O coeficiente de condutividade hidráulica é sempre baixo para solo e expresso em termos de potências de base 10, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos sedimentares em m/s.

| | |
|------------------|-----------------------|
| Argilas | $< 10^{-9}$ |
| Siltes | 10^{-6} a 10^{-9} |
| Areias argilosas | 10^{-7} |
| Areias finas | 10^{-5} |
| Areias médias | 10^{-4} |
| Areias grossas | 10^{-3} |

Fonte: Adaptado, Pinto (2006).

Os dados acima citados são valores característicos, mas que podem não seguir tal comportamento, visto que a condutividade hidráulica depende invariavelmente da viscosidade do fluido permeante no solo, que por sua vez depende da temperatura (DANIEL, 1994 *apud* BENETTI, 2015).

A variabilidade da grandeza permeabilidade é ainda dependente de muitos outros fatores. Três deles são geralmente levados em consideração, por serem os mais relevantes, na definição inicial dos coeficientes de permeabilidade como: grau de saturação, dimensão e arranjo estrutural das partículas sólidas (FIGUEIREDO, 2017).

Maragon (2018) disserta a respeito de cada um desses fatores, inicialmente começando pela dimensão dos grãos, esta tem grande influência no coeficiente de condutividade hidráulica, pois são as partículas finas que o determinam de um modo geral. A respeito do estado do solo, afirma que este é influenciado pelo índice de vazios, implicando que: quanto mais fofo um solo, este tende a ser mais permeável (maior porosidade). Além dos vazios, a permeabilidade depende também da disposição relativa dos grãos (estrutura), como por exemplo solos argilosos com estrutura floclulada tendem a ter maior permeabilidade, do que um solo com estrutura dispersa, mesmo que ambos tenham mesmo índice de vazios. E um último fator a ser levado

em consideração é o grau de saturação, visto que o coeficiente de condutividade hidráulica de um solo não saturado é menor do que o que ele apresentaria se estivesse totalmente saturado.

Ainda segundo Pinto (2006) um fator preponderante para a definição do arranjo do solo de uma obra de terra é a umidade em que o solo é compactado. Como já supracitado a cima com relação a estrutura, em termos gerais, quando o solo é compactado mais seco apresenta partículas na estrutura floculada, proporcionando maior permeabilidade, do que quando compactado no ramo úmido, apresentando estrutura dispersa, mesmo que em ambos os casos tenha-se o mesmo índice de vazios. Uma estrutura dispersa implica na orientação das partículas e conseqüentemente permeabilidade no sentido vertical bem menor que no horizontal.

2.2. FLUXO BIDIMENSIONAL

O solo é fundamentalmente um material anisotrópico, onde a isotropia é utilizada para simplificações em termos de modelagem e fundamentação de hipóteses. A anisotropia infere que o solo não tem as mesmas propriedades em todas as direções, incluindo a permeabilidade, logo a permeabilidade varia com a direção do fluxo, principalmente para solos sedimentares (MASSAD, 2003).

Segundo Assis *et al* (2003) a análise de fluxo em barragens de terra é feita de forma bidimensional, desconsiderando a terceira dimensão. Com isso, é possível restringir-se o estudo do fluxo de água em um maciço em um plano, visto que a água tem a tendência a seguir caminhos de forma curva, mas contidos em um mesmo plano.

A mensuração da permeabilidade de forma bidimensional utiliza as redes de fluxo. Sendo a solução gráfica da equação da continuidade de Laplace, apresentada na Equação 4, que considera os coeficientes de permeabilidade iguais nas duas direções analisadas ($k_x=k_z$) (MARAGON, 2018).

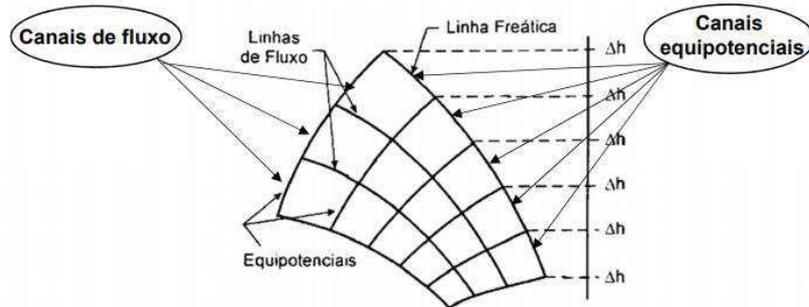
$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

Segundo Ortigão (2007) a simplificação de uma rede de fluxo (representação do fluxo através de um meio poroso), consiste em um conjunto de linhas de fluxo e linhas equipotenciais que se cruzam em ângulos retos. A rede pode ser obtida graficamente por tentativas e, uma vez isto feito, podem ser determinados poropressões e gradientes hidráulicos em qualquer ponto. Em seguida, conhecendo-se a permeabilidade, determina-se a vazão que percolada no maciço.

As linhas de fluxo são linhas que indicam a trajetória das partículas do fluido percolado, através da seção transversal; sendo estas espaçadas igualmente formando canais de fluxo de

mesma vazão. E as linhas equipotenciais representam o lugar geométrico dos pontos de mesma quantidade de energia ou carga hidráulica, que interceptam as linhas de fluxo com ângulos retos (SIMÕES DE OLIVEIRA, 2008), como mostra a Figura 2. Entre duas equipotenciais adjacentes ocorre uma perda de carga, que é igual à perda total de carga dividida pelo número de perdas de carga (canais equipotenciais).

Figura 2: Canais de fluxo e canais equipotenciais.



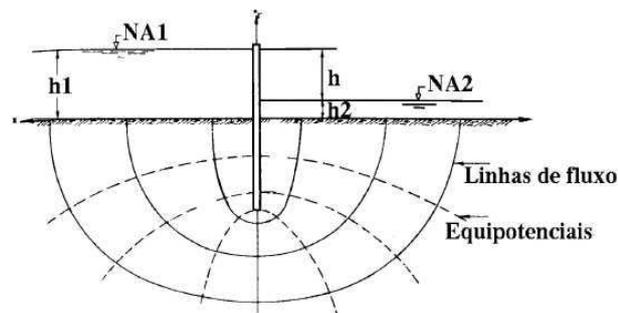
Fonte: Adaptado de Casagrande (1964) *apud* Massad (2003)

Para Machado *et al* (2001) qualquer que seja o método adotado para determinação da rede de fluxo é necessário definir previamente as condições limites ou de contorno do escoamento, as quais podem se representar numa situação de fluxo confinado ou de fluxo não confinado. Assim é definido as condições limites, já indicadas na Figura 2:

- Superfície de entrada (equipotencial de carga máxima)
- Superfície de saída (equipotencial de carga mínima)
- Linhas de fluxo

Com as condições de contorno definidas, se esboça a solução gráfica da rede fluxo de forma satisfatória a estas condições, como apresenta a Figura 3:

Figura 3: Rede de fluxo em uma estaca prancha.



Fonte: Machado *et al* (2001).

O traçado da rede com cada elemento de fluxo de forma aproximadamente quadrada é feito sabendo-se que a vazão de entrada em uma rede fluxo é a mesma da saída (DAS, 2014). Assim seguindo os elementos da Figura 3 associados a lei de Darcy, pode se determinar a vazão a jusante de acordo com a solução gráfica (número de canais de fluxo - N_f e número de quedas de potencial - N_d), o parâmetro de permeabilidade e a diferença de carga, como apresenta a Equação 5:

$$Q = k \frac{hN_f}{N_d} \quad (5)$$

Onde: Q = vazão por metro longitudinal do maciço

k = permeabilidade do solo.

h = diferença de carga entre entrada e saída.

N_f = número de canais de fluxo

N_d = número de quedas de potencial (canais equipotenciais)

Assim a determinação da vazão por metro de barragem pode ser determinada, considerando o solo isotrópico, ou seja com mesma permeabilidade nas duas direções. Mas como sabe-se a permeabilidade é distinta nas duas direções e possui comportamento distinto, logo a anisotropia do meio deve ser considerada. De tal forma que deve-se mudar também a solução gráfica, alterando a escala gráfica do desenho, como propõe (DAS, 2014,):

- 1) Adotar uma escala vertical (eixo z) para desenho da seção transversal.
- 2) Adotar uma escala horizontal (eixo x) tal como a escala horizontal = $\sqrt{k_z/k_x} \times$ escala vertical.
- 3) Com as respectivas escalas adotadas, plota-se a seção vertical pela camada permeável paralela à direção de fluxo.
- 4) Traçar a rede de fluxo da seção, com linhas de fluxo cruzando as linhas equipotenciais em ângulos retos, similar a Figura 3.

Por tanto também há alterações na Equação (5), apresentada, isto é, há-se a substituição de uma única permeabilidade aplicada, pela raiz do produto das permeabilidades nas duas direções; como apresentado como fator de escala anteriormente ($\sqrt{k_z/k_x}$).

Ainda sobre a heterogeneidade de um solo, este pode ter estratificações verticais ou horizontais. Para a fundação de uma barragem que, por exemplo, pode ter camadas de solos

com comportamentos distintos, assim como as seções de barragens de terra zoneadas, onde há a presença de diferentes solos compactados (MASSAD, 2003). Com a premissa que a vazão percolada é a mesma, logo, o que irá variar entre as camadas será a velocidade de percolação. De forma que quando construída a solução da rede de fluxo da estrutura em análise verifique-se essa condição, visto que essa também influencia diretamente as dimensões do elemento de percolação.

Os problemas de fluxo bidimensional ainda podem ter solução através de métodos numéricos, criando-se uma rede de elementos finitos, assim possibilitando calcular com razoável precisão a carga total em cada ponto. Tais análises são feitas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), verificando inclusive traçados de rede em materiais não homogêneos (PINTO, 2006).

2.1 Cálculo do fluxo bidimensional por elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um dos métodos numéricos próprios para a solução de equações diferenciais, graças a sua versatilidade que faz com que esse método seja o mais utilizado para resolver numericamente fenômenos governados por equações diferenciais parciais, como a de Laplace para fluxo bidimensional (ANTUNES, 2004).

Segundo Ribeiro (2017) três são os passos seguidos em uma análise de percolação através do MEF. O primeiro passo é a modelagem do problema, que consiste em definir a malha de elementos finitos, determinar as propriedades dos materiais constituintes e especificar as condições de contorno. O segundo passo consiste em processar o modelo através da formulação e solução do sistema de equações de elementos finitos. Por fim, o terceiro passo consiste na interpretação dos resultados. Nos resultados são obtidas informações das cargas hidráulicas, poropressões, gradientes e vazões.

Cerqueira (2004) disserta a respeito do uso do software SEEP/W, onde este gera dados de carga hidráulica nos nós da malha de elementos finitos, para isso são necessários os dados da curva característica, um modelo para a condutividade hidráulica e condições de contorno. Dentre as informações que podem ser determinadas por este programa estão: a quantificação de vazão, poropressão, velocidade e fluxo de água através do corpo e fundação (SOLEYMANI; AKHTARPUR, 2011).

Segundo Arshad e Babar (2014) as condições de contorno são definidas como: (i) preenchimento de limite de nível superior e inferior do reservatório, isto é, condições associadas

à solução de Dirichlet como condições de contorno para a solução das equações parciais diferenciais de fluxo; (ii) para a fundação nível superior e inferior, considerado fluxo zero como condição de contorno, pela solução de Neuman.

Diante do contexto, diversos estudos trabalharam com estudos de fluxo dentro dos diversos tipos de barragens para represamento de água ou rejeitos de minérios, como através de taludes para estudo de estabilidade (SOARES, 2006; FRANÇA & GOMES, 2007; RIBEIRO, 2017).

Ribeiro, (2017) ao utilizar o modelo numérico de elementos finitos no estudo de barragens de rejeitos, constatou que a relação entre permeabilidades de distintos materiais e áreas exercem forte influência no regime de fluxo e nas poropressões desenvolvidas no maciço, correspondendo em aspectos de drenagem e conseqüentemente na estabilidade deste. Além disso segundo o mesmo autor, o modelo apresenta correlação entre os dados *in situ* (fornecidos por piezômetros) e os dados gerados pelo programa SEEP/W para a linha piezométrica.

Arshad e Babar (2014), utilizaram o SEEP/W como mecanismo de estudo de gradientes hidráulicos e volume percolado através da fundação de uma barragem. Onde obtiveram simulações com parede-diafragma, que objetivava reduzir a percolação e o gradiente hidráulico. Quando aplicado o método à obra em questão, não houveram diferenças consideráveis entre os dados de ascultação e os dados simulados. Isto, mostra a eficiência do programa em modelar em diferentes condições e apresentar resultados satisfatórios.

2.3. FLUXO EM BARRAGENS DE TERRA

A percolação é um dos principais agentes causadores de problemas a serem resolvidos pelos profissionais envolvidos com projetos, construção e operação de barragens de terra; em virtude dos efeitos das subpressões, das perdas de resistência do solo por acréscimo do grau de saturação e dos processos de erosão à jusante da barragem (GAIOTO, 1992). No entanto, a possibilidade de fazer uma obra que seja totalmente estanque é inconcebível, mas o controle de percolações deve ser feito através de métodos que forneçam parâmetros seguros.

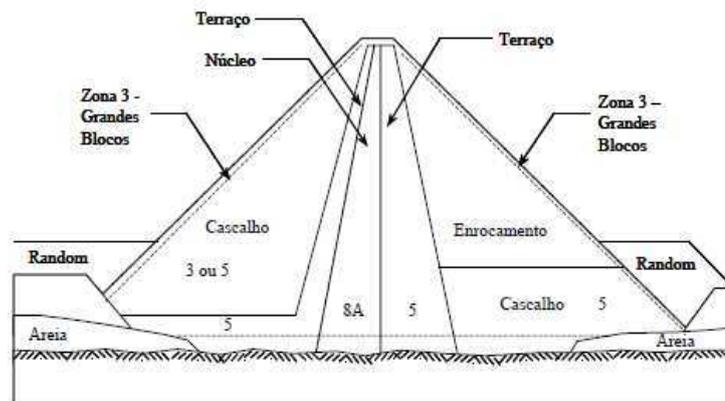
Para os problemas de percolação em meios heterogêneos, em que a incógnita é a vazão, é possível levantar algumas hipóteses simplificadoras que possibilitam a determinação de parâmetros significativos de projeto (MASSAD, 2003). Ainda pode-se fazer a homogeneização

de parâmetros para a solução simplificada. De forma prática buscam-se soluções que tenham aplicabilidade aos métodos construtivos usuais.

Segundo Gilbert G. (2004), os principais métodos de controle de percolação pelo maciço da barragem são:

- Taludes planos sem drenos: Para algumas barragens construídas com solos ditos impermeáveis com talude planos, altos níveis de reservatório, a superfície freática pode estar bem definida. A inclinação a jusante e os gradientes de escape podem ser suficientemente baixos para evitar falhas por *piping*. Uma manta de drenagem horizontal sob a jusante do aterro ainda pode ser necessária para o controle de *underseepage* (força de percolação ascendente).
- Zoneamento de aterro. Os aterros são zoneados para usar o máximo de material possível de escavação e de áreas emprestadas com as distâncias mais curtas, e ao mesmo tempo manter a estabilidade e controlar a infiltração. Para maior controle da vazão e a infiltração durante o rebaixamento do reservatório, a permeabilidade deve aumentar do núcleo para fora em direção a cada inclinação, como a execução com trechos de diferentes materiais, como apresenta a Figura 4.

Figura 4: Exemplo de barragem de seção Zoneada, Barragem de São Simão, Brasil.



Fonte: Assis *et al* (2003)

- Drenos verticais (ou inclinados) e horizontais: por causa das características muitas vezes variáveis dos materiais de empréstimo, drenos verticais (ou inclinados) e horizontais dentro da porção a jusante do aterro, são inseridos para garantir o controle satisfatório da infiltração. Além disso, o dreno vertical (ou inclinado) fornece a linha principal de defesa para controlar vazamentos concentrados através do núcleo de uma barragem de terra.

Além do maciço, o controle de percolação através da fundação da barragem, a depender do tipo de fundação, também se faz necessário. Com isso, aplica-se soluções de impermeabilização para controle de vazão e gradiente hidráulico a jusante. Dentre as soluções mais comuns estão: tapetes impermeáveis, trincheiras de vedação, diafragmas plásticos, paredes diafragma e cortinas de injeção. De forma ampla as soluções de impermeabilização devem ser apenas consideradas à montante e as de drenagem à jusante. Tais mecanismos em geral são consideradas de forma combinada (ASSIS *et al.*, 2003).

O uso de solos como material de impermeabilização implica a estes uma baixa condutividade hidráulica. Para se obter solos com tal característica, segundo Benetti (2015), utilizam-se solos altamente plásticos, que possuem características de contração e expansão mediante mudanças de umidade. Enquanto a expansão moderada pode não ser prejudicial, a fissuração causada pelo ressecamento durante as estações secas pode fazer com que a camada de argila perca a sua função. Com isso, a estabilização química de solos pode vir a sanar a fragilidade do uso deste material, no tocante as características de retração e expansão; além de contribuir com a estanqueidade da área.

Um mecanismo simples como o núcleo de baixa permeabilidade, se bem projetado, pode evitar rupturas. Visto que a grande maioria destes eventos são causadas por algum tipo de percolação. Estas rupturas podem ser classificadas em duas categorias: as que ocorrem quando partículas de solo migram em direção a região externa ao aterro, causando *piping* (rupturas ocasionadas por erosões) e aquelas causadas por padrões de percolação descontrolados que conduzem à rápida saturação do solo e à elevação da subpressão e da força de percolação trazendo o barramento a ruína (CERDEGREN, 1977).

O processo de antever rupturas, passa pela fomentação de dados, que asseguram o funcionamento da solução proposta. De acordo com Assis *et al.*, (2003) em relação a percolação, o comportamento de barragens pode ser verificado através de uma instrumentação adequada, como piezômetros e medidores de vazão, nas regiões mais críticas. Os dados obtidos fornecem subsídios para o processo de tomada de decisão, que inclui:

- Reavaliar a segurança da obra em qualquer fase de seu funcionamento;
- Tomar medidas oportunas de controle;
- Verificar as hipóteses originais de projeto.

O controle de barragens de terra é primordial, não só na sua operação, mas também em na construção, visando a melhor técnica, a segurança e a relação custo-benefício. Nesse aspecto

o Manual de Pequenas Barragens de Terra (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE NATIONS, 2011) explicita que os aterros homogêneos podem ser baratos e seguros, quando corretamente construídos. São, no entanto, geralmente inferiores em eficiência com relação aos métodos modernos de construção zoneada, em que um aterro é construído em três seções: seção a montante relativamente impermeável; núcleo central de materiais altamente impermeáveis (incluindo uma trincheira de vedação abaixo do nível de superfície, selará a barragem de forma eficaz contra infiltrações); e uma seção a jusante de materiais grosseiros (maior peso específico), permitindo uma drenagem mais livre da estrutura e a qual, pelo seu peso, escora o aterro às suas fundações evitando o escorregamento do maciço e movimentações.

Na execução de um aterro zoneado é necessária a disponibilidade de uma gama de solos para uma construção do maciço que satisfaça as condições de projeto, porém nem sempre é disponível. Logo, sendo necessária a aplicar uma nova composição, de uma material com aditivos, de modo que apresente a capacidade de suporte associada a uma permeabilidade que o tornem propenso a uma melhor aplicação ao conjunto.

Assim Herrier *et al.* (2012; 2017) ao retomar uma antiga técnica de contenção, nos Estados Unidos, introduziram o uso de materiais cimentantes em obras hidráulicas (diques, canais, núcleos de barragens e etc.), obtendo resultados positivos que indicam o aprimoramento mecânico, à erosão e redução de permeabilidade conferidos pela adição com cal. Ainda obtendo vantagens específicas como: reutilização de argilas na fundação de diques ou barragens, graças à estabilidade conferida com a adição de cal; a redução de rachaduras de contração, melhor trabalhabilidade e facilidade procedimentos de compactação em regiões quentes e secas. Os autores ainda buscam adequar a metodologias de aplicação e dosagem de materiais como cimentantes.

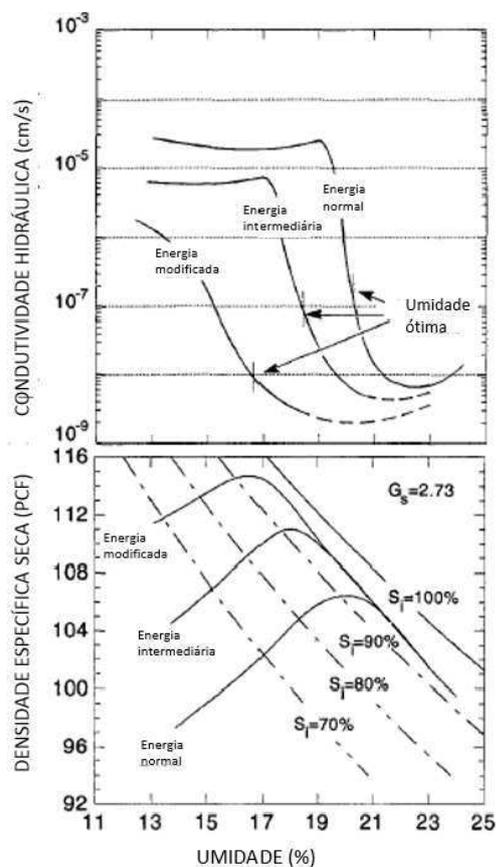
2.4. PERMEABILIDADE EM SOLOS ESTABILIZADOS QUIMICAMENTE

O uso de material de baixa permeabilidade (argilas) em núcleos de barragem devem ser analisados de forma a assegurar sua finalidade, em virtude de que vários fatores independentes afetam a permeabilidade da argila, incluindo a densidade do solo, a teor de umidade utilizado na compactação, índice de vazios e a composição mineralógica da argila (OZCOBAN, 2008). Assim é possível mudar o arranjo e propriedades deste solo, através do processo de melhoramento, para oferecer uma melhor condição de estanqueidade. O melhoramento de solo pode ser feito por intermédio de três mecanismos básicos: a mecânica, a física e a química.

O processo mecânico dá-se basicamente através da compactação de um solo, isto é, aplicando-se energia para densificar o solo, por meio de equipamento mecânico; além da redução dos vazios diversas propriedades melhoram, principalmente as de resistência (PINTO, 2006).

Dentro do processo de compactação Mitchell *et al.*, (1965) identificou as variáveis críticas que influenciam a condutividade hidráulica da argila compactada. Eles mostraram que a condutividade hidráulica é sensível ao teor de água e ao esforço de compactação (Figura 5); como o teor de água para além do ideal ou o compatível esforço é elevado, a condutividade hidráulica diminui. Além disso, a menor condutividade hidráulica ocorre no teor de umidade ligeiramente (2-4%) acima do teor ótimo de água. Ainda para Benson (1994) no teor de umidade ótima, as deformações de cisalhamento induzidas pela compactação são mais eficazes em remodelar agregados e reorientar as partículas de argila em um arranjo compacto e orientado. Consequentemente, o tamanho dos poros é reduzido assim como o fluxo e a condutividade hidráulica diminui.

Figura 5: Relação entre Condutividade Hidráulica, Teor de Água e Energia de Compactação.



Fonte: Adaptado Benson *et al* (1994)

A estabilização física é basicamente a correção granulométrica para satisfazer a condição proposta, isto é, consiste na alteração das propriedades do solo através da adição ou retirada de partículas do mesmo, procurando-se obter como produto final um material adequado para a aplicação em cada caso particular (ARRIVABENI, 2017).

A estabilização química é definida como qualquer procedimento no qual um material ou composto químico, seja ele cimentante ou não, é adicionado ao solo atribuindo-o melhorias em suas propriedades do ponto de vista da engenharia (PATRICIO, 2015).

Na estabilização química a utilização de aditivos químicos confere *a priori* melhor capacidade de suporte como cita Goularte & Pedreira (2009):

“[...]quando utilizada para solos granulares visa principalmente melhorar sua resistência ao cisalhamento (causado pelo atrito produzido pelos contatos das superfícies das partículas) por meio de adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos. Os ligantes mais utilizados são o Cimento Portland, Cal, Pozolanas, materiais betuminosos, resinas etc. Nos solos argilosos (coesivos) encontramos estruturas floculadas e dispersas que são mais sensíveis a presença de água, influenciando a resistência ao cisalhamento. É comum a adição de agentes químicos que provoquem a dispersão ou floculação das partículas ou uma substituição prévia de cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidrorrepelentes seguida de uma adição de cimentos.

A aplicação de agentes cimentantes junto ao solo geralmente têm o objetivo, de aumentar a resistência ao cisalhamento no compósito, tal aplicação traz modificações que podem influenciar na permeabilidade, devido às ligações entre partículas. A redução da permeabilidade ocorre devido o preenchimento de vazios por estes ligantes durante o processo de aglutinação das partículas de solo. Dentre os materiais cimentantes mais estudados para estabilização associado a redução da permeabilidade, estão o cimento e a cal.

Segundo Rojas (2012) o cimento quando comparado com a cal apresenta resposta em um menor intervalo de tempo bem menor, visto que sua cura ocorre em menos tempo. Quimicamente ambos agem de forma a alcalinizar o ambiente, tendo como principais vantagens do tratamento químico de solos:

- Custo relativamente baixo se comparado ao de transporte de material a depender da jazida;
- Aplicáveis a diferentes tipos de solos;
- Usa equipamentos facilmente disponíveis e simples.

O uso do Cimento Portland é amplamente estudado como material de melhoramento de solo, e existem muitas análises à respeito do seu uso e sua influência no parâmetro de permeabilidade. Bellezza e Pasqualini (1997) *apud* Rojas (2012) descreve que a adição de cimento pode diminuir a permeabilidade do material original após algum tempo de cura; mas estes valores de permeabilidade dependem do tipo de solo e da umidade de compactação. O aumento do tempo de cura diminui o valor de condutividade hidráulica, podendo chegar a valores muito menores que os solos não tratados.

Há ainda características implícitas ao uso do solo-cimento que tem grande influência sobre o processo de aglomeração e permeabilidade no compósito, como conclui Azambuja (2004) que para amostras de solo cimentadas, quanto menor for o fator água-cimento menor é a condutividade hidráulica na mistura.

A cal é amplamente utilizada em correções de solo, podendo ser utilizado em suas duas formas: virgem e hidratada. Este aglomerante formado basicamente por óxidos de cálcio (CaO) ou óxido de Magnésio (MgO) resultante da calcinação das rochas calcárias (calcitas e dolomitos). Quando submetidas a altas temperaturas o calcário calcítico reage formando o CaO, enquanto calcários dolomíticos reagem formando CaO e MgO. Neste estágio ambas as formas são chamadas de cal virgem. A reação da cal virgem com uma quantidade de água forma o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) chamada neste estágio de cal hidratada (PATRICIO, 2015).

O uso da cal no melhoramento de solos pode ser feito através de dois processos, segundo a National Lime Association (2001), modificação e estabilização., a qual descreve a função da cal em cada um dos processos:

- **Modificação do solo:** A cal é uma excelente escolha para a modificação a curto prazo das propriedades dos solos. Esta pode modificar quase todos os solos de granulação fina, mas a melhoria de maior relevância ocorre em solos argilosos de moderada a alta plasticidade. A modificação ocorre porque os cátions de cálcio fornecidos pela cal hidratada substituem os cátions normalmente presentes na superfície da argila mineral, promovida pelo ambiente de pH elevado do sistema de cal-água. Assim, a mineralogia da superfície da argila é alterada, reduzindo a plasticidade, a capacidade de retenção de água, a expansão, assim trazendo uma melhor estabilidade.
- **Estabilização do solo:** A estabilização do solo ocorre quando a cal é adicionada a um solo reativo para gerar ganho de resistência a longo prazo através de uma reação pozolânica. A reação pozolânica pode continuar por um período muito longo, até mesmo

décadas - contando que uma quantidade de cal suficiente esteja presente e o pH permaneça alto (acima de 10). Como resultado, o tratamento com cal pode produzir ganhos de resistência altos e duradouros. A chave para reatividade pozolânica e estabilização é um solo reativo, um bom protocolo de projeto de mistura e confiáveis práticas de construção.

Logo identifica-se à “modificação” como sendo atribuída às mudanças na granulometria e nos índices físicos dos solos, enquanto a “estabilização” está restrita às reações pozolânicas que conferem a resistência ao material (CASTRO, 1981). Assim no que se refere ao tratamento de um maciço de solo, onde se tenha que preservar as características de estabilidade durante toda a vida útil da obra o mecanismo mais adequado seria a estabilização, principalmente devido ao processo de aglomeração ser contínuo.

Silveira (1979) trata da primeira variação física que a cal provoca nos solos finos, provocando a modificação no solo, no caso é o processo de floculação e aglomeração das partículas de argila, produzindo um solo mais grosseiro, mais friável e permeável, tratando-se de uma modificação do material. Assim os aglomerados formados com a adição da cal nas argilas podem se desfazer quando submersos em água, porém alguns deles podem se tornar hidrofóbicos e manter a agregação após longos períodos de molhagem, influenciados pela quantidade de cal presente na área.

Para que as reações de aglomeração entre o solo e a cal aconteçam faz-se necessária a presença de água. Como explicam Ingles e Metcalf (1972) os efeitos da estabilização dependem da interação de um produto químico com a cal, junto a um argilomineral do solo para formar uma mistura cimentante. As reações pozolânicas responsáveis pelo aumento da mistura, iniciam com o aumento do pH pela hidroxila disponibilizada pela cal, que permite a dissolução da sílica e alumina do solo, criando géis de silicato. Estes géis resultantes da reação imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios. A cristalização desses géis é lenta; transformando-os em silicatos de cálcio bem definidos.

Benetti (2015) identifica que a quantidade de cal, por si só, não é fator preponderante para a redução da condutividade hidráulica. Mas sim que a redução da porosidade apresenta uma maior efetividade na redução desse parâmetro, além desta conduzir a incrementos de resistência.

2.5. INFLUÊNCIA DA RAZÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE ADITIVO

O método de previsão de comportamento do solo com base na metodologia da razão porosidade/teor volumétrico de aditivo dá-se de maneira análoga a metodologia do fator água/cimento, para as argamassas e concretos (FOPPA, 2005), principalmente no tocante avaliação de resistências.

A metodologia porosidade/teor volumétrico de aditivo é também um método de previsão de condutividade hidráulica comprovado por Benetti (2015) e Ibeiro (2016), onde ambos estudos analisaram o mesmo material tratado com cal e cimento. Estes estudos concluíram que a metodologia é eficaz na previsão de coeficiente de condutividade hidráulica, utilizando o mesmo coeficiente de minoração ao qual é elevado o teor volumétrico de material cimentante, utilizado no ajuste de dados dos resultados de resistência versus porosidade/teor volumétrico de aditivo. Como mecanismo de previsão aplicado em diversos estudos que mostram que este, já é um método considerado consolidado e aplicável a diversos cenários (FOPPA, 2005; SALDANHA & CONSOLI, 2016; SILVANI, 2017; TENÓRIO, 2019).

Logo, analisar os fatores diretos da razão, vê-se que a porosidade exerce forte influência, pois quando reduzida a porosidade de qualquer material promove-se uma diminuição da condutividade hidráulica. Além dos materiais formados devido a cimentação consequente do agente cimentante tender a diminuir a porosidade do solo e consequentemente sua condutividade hidráulica (BENNETI, 2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

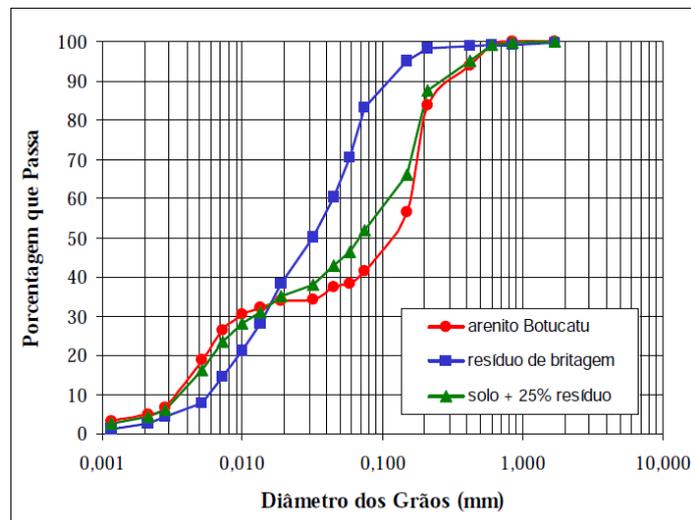
3.1.1. Solo

O presente estudo quantificou e analisou a percolação através de simulações do maciço uma barragem de terra, onde foram utilizados dados obtidos através de estudos de comportamento do Solo Residual de Arenito da formação Botucatu (SRAB). Este tipo de solo cobre significativa área das regiões Sul e Sudeste do Brasil. Aterial pesquisado de forma ampla pela sua importância na região como material de engenharia, o SRAB têm sua composição granulométrica apresentada na Figura 6, assim como suas características na Tabela 2 obtida de pesquisas precursoras como as de Foppa (2005) e Lopes Junior (2007) que tratam do uso desse solo e do seu melhoramento.

3.1.2. Resíduo

O Resíduo de Britagem de Rocha Basáltica (RBR), foi aplicado da forma pulverizada (fração fina) visto que este dentro da mistura com cal é potencialmente reativo (BENETTI, 2015). Tem sua granulometria apresentada na Figura 6.

Figura 6: Curva granulométrica dos materiais.



Lopes Junior (2007)

Estudos evidenciaram sua utilização como estabilização de solo, dando uma possível finalidade a um material poluente, como apontaram estudos de Lopes Junior (2007 e 2011), que ainda apresenta caracterização desse material presente na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades do Solo Residual Arenito Botucatu e do Resíduo de Britagem do Basalto

| Propriedades | Resíduo do Basalto | Solo Residual de Arenito |
|------------------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| Limite de Liquidez (LL) | 28% | 23% |
| Limite de Plasticidade (LP) | 20% | 13% |
| Índice de Plasticidade (IP) | 8% | 10% |
| Peso específico dos grãos (kN/m ³) | 33,3 | 26,4 |
| % de Areia Média (0,2 < φ < 0,6 mm) | 1,9% | 16,2% |
| % de Areia Fina (0,06 < φ < 0,2 mm) | 38,4% | 45,4% |
| % de Silte (0,02 < φ < 0,06 mm) | 57,5% | 33,4% |
| % de Argila (φ < 0,002 mm) | 2,2% | 5,0% |
| Diâmetro efetivo (D ₁₀) | 0,0066 mm | 0,0032 mm |
| Coefficiente de uniformidade (Cu) | 9 | 50 |

Fonte: Adaptado de FOPPA (2005) e Lopes Junior (2007)

3.1.3. Cal

Material utilizado na melhoria de solos, a cal, é produzida através do processo de calcinação, em temperaturas próximas a 1000°C, de rochas carbonatadas cálcicas e magnesianas. Em geral a inserção da cal afeta favoravelmente certas propriedades do solo, como: granulometria, plasticidade, contração e retração, resistência, condutividade hidráulica, entre outros (GUIMARÃES, 1998).

Para os dados base aqui adotados oriundos do programa experimental de Beneti (2015) que utilizou a cal hidratada do tipo dolomítica. Com sua composição exemplificada dentro do estudo de Guimarães (1998) e apresentada na Figura 7, para as Cales brasileiras.

Figura 7: Composição média das cales brasileiras

| Tipo de Cal | CaO (%) | MgO (%) | Insolúvel no HCl (%) | Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ (%) | Perda ao Fogo (%) | CO ₂ (%) | SO ₃ (%) | CaO + MgO Base de Não-Volátil (%) | MgO Não Hidratado (%) |
|----------------------------------------|---------|---------|----------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Cal Virgem Cálcica | 90-98 | 0,1-0,8 | 0,5-3,5 | 0,2-1,0 | 0,5-5,0 | 0,2-3,8 | 0,1-0,6 | 96,0-98,5 | - |
| Cal Hidratada Cálcica | 70-74 | 0,1-1,4 | 0,5-2,5 | 0,2-0,8 | 23-27 | 1,5-3,5 | 0,1-0,0 | | 0,5-1,8 |
| Cal Hidratada Dolomítica ou Magnésiana | 39-61 | 15-30 | 0,5-18,2 | 0,2-1,5 | 19-27 | 3,0-6,0 | 0,02-0,2 | 76-99 | 5-25 |
| Cal Virgem Dolomítica ou Magnésiana | 51-61 | 30-37 | 0,5-4,5 | 0,2-1,0 | 0,5-4,8 | 0,5-4,5 | 0,05-0,1 | | - |

Guimarães (1998).

3.1.4. Mistura Solo-Resíduo-Cal

A mistura parte da fixação do teor do resíduo para o solo melhorado. Sendo o material inicial a mistura do Solo Residual de Arenito Botucatu com 25% de Resíduo de Britagem do Basalto (SRAB-25%RBR), teor de resíduo amplamente estudado (CARRARO, 1997; LOPES JÚNIOR, 2007; LOPES JÚNIOR, 2011) e ainda através de estudos prévios de caracterização destes materiais obtidos por Foppa (2005) e Lopes Junior (2007) apresentados na Tabela 2. O estudo complementar Benetti (2015) aplicou a esta composição a cal em diferentes proporções, obtendo como os dados presentes na Tabela 3.

Tabela 3: Dados de condutividade hidráulica em função dos teores de cal e peso específico aparente seco.

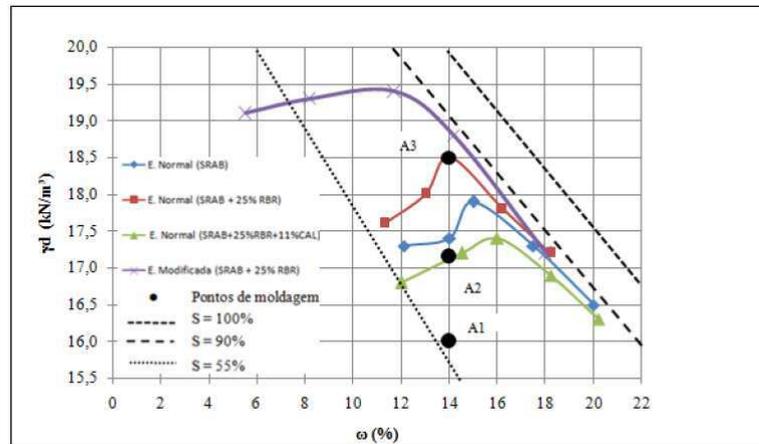
| Teor de cal (%) | γ_d (kN/m ³) | k_{20} (m/s) |
|-----------------|---------------------------------|----------------|
| 0 | 18,5 | 2,57E-08 |
| | 17,2 | 2,25E-07 |
| | 16,0 | 3,28E-07 |
| 5 | 18,5 | 4,82E-08 |
| | 17,2 | 3,47E-07 |
| | 16,0 | 1,63E-06 |
| 7 | 18,5 | 6,86E-08 |
| | 17,2 | 2,73E-07 |
| | 16,0 | 9,07E-07 |
| 9 | 18,5 | 3,38E-08 |
| | 17,2 | 2,17E-07 |
| | 16,0 | 1,25E-06 |

Fonte: Benetti (2015)

A aplicação dos dados derivados de parte da pesquisa de Benetti (2015) traz como principal parâmetro de entrada o coeficiente de condutividade, resultante da avaliação deste dado para os teores de 5%, 7% e 9% de cal, aplicados a mistura SRAB-25%RBR. Além da variação dos pesos específicos aparente seco, propostos por Lopes Junior (2011) e aplicados por Benetti (2015), nos níveis de 16, 17,2 e 18,5 kN/m³, como mostra a Figura 8. Onde ao fixar-se a umidade de compactação em 14%, sendo estabelecida de modo que estes ficassem

compreendidos dentro da faixa de pesos específicos aparentes secos e teor de umidade exequível numa situação de campo e laboratório.

Figura 8: Pesos específicos aparente secos referentes aos dados de Benetti (2015)



Fonte: Adaptado de Lopes Junior (2011).

3.2. MÉTODOS

A análise do material aplicado como núcleo foi feita com diferentes teores de cal, levando em conta ainda distintos pesos específicos aparentes secos que resultaram em diferentes coeficientes de condutividade hidráulica (k_{20}), como apresentados na Tabela 3. O material referente a parte do maciço (área externa ao núcleo) foi analisado através da inserção dos dados com teor de 0% de cal e variando apenas o seu peso específico aparente seco.

Além da análise a respeito do teor de cal e o peso específico aparente seco (γ_d) do núcleo, também foram aplicadas e verificadas distintos formatos de núcleo, com a finalidade de se obter dados à respeito da influência das dimensões desse núcleo na vazão percolada através do maciço. Foram utilizados núcleos trapezoidais, com base menor com mesma dimensão da largura do coroamento da barragem (8 m) e base maior variável. Na Figuras 8 apresenta um modelo de núcleo trapezoidal com base maior de 20 metros, base menor de 8 metros e altura igual ao maciço. Respectivamente, para os outros dois modelos apresentam a mesma geometria, no entanto para o modelo da Figura 9 a base maior passa a ser de 45 metros e para o modelo da Figura 10 a base maior passa a ser de 70 metros.

Figura 9: Núcleo com base de 20 m

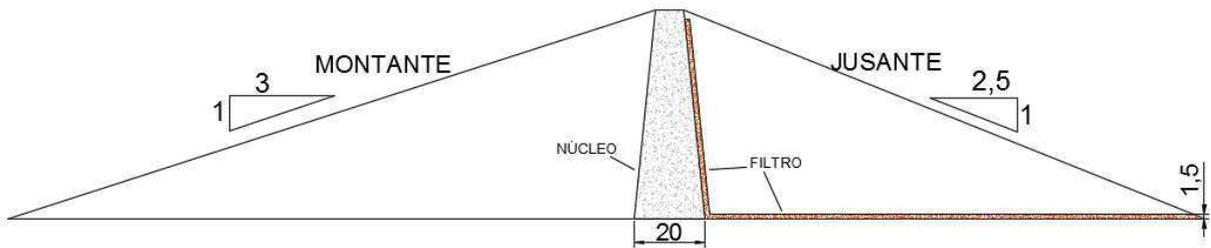


Figura 10: Núcleo com base de 45 m

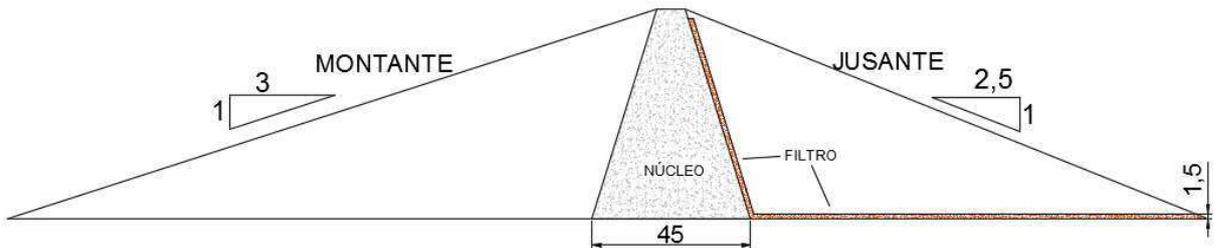
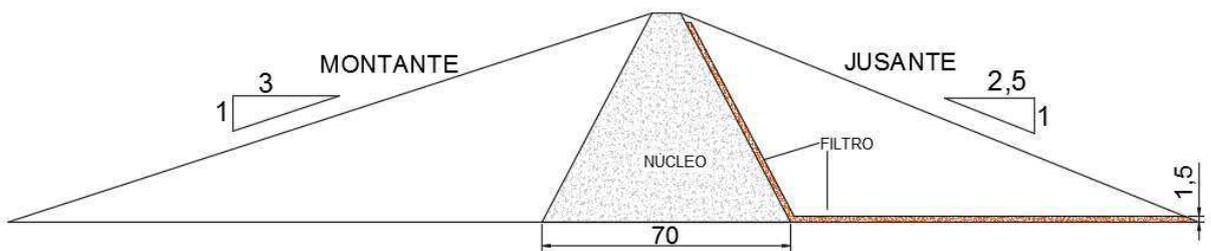


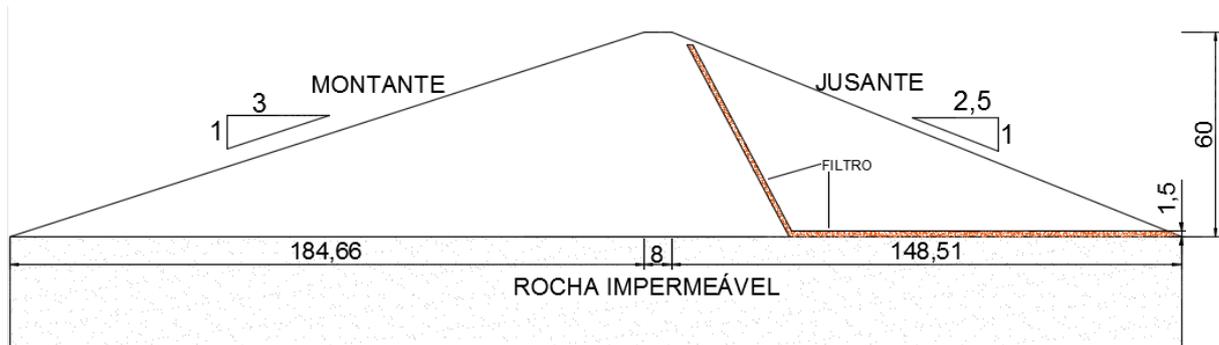
Figura 11: Núcleo com base de 70 m



3.2.1. Barragem analisada

Para a aplicação dos dados de condutividade hidráulica (k_{20}), adotou-se uma seção transversal da barragem e nível de água do reservatório. Assim tomou-se a seção adaptada da seção transversal do maciço do Açude Epitácio Pessoa, popularmente conhecido como “o Boqueirão”, localizado no estado da Paraíba (DNOCS, 1963). Ainda adotou-se uma fundação em rocha, para uma melhor verificação da influência do núcleo. Ao modelo de barragem, apresentado na Figura 11, foi aplicado um filtro do tipo vertical e horizontal, de material granular, segundo os critérios de filtro de Terzaghi (1922). Para o material adotado, considerado uma areia média, ordem de $k=10^{-4}$ m/s. Adotou-se, para a modelagem, uma espessura de 1,5 metros, considerando aspectos de execução. Usualmente este filtro é aplicado a barragens, com o objetivo de conduzir a carga para jusante de forma a suprimir as percolações na face do talude. Assim garantindo uma maior segurança contra a ocorrência de *piping*.

Figura 12: Seção transversal da barragem a ser analisada, dimensões em metros.



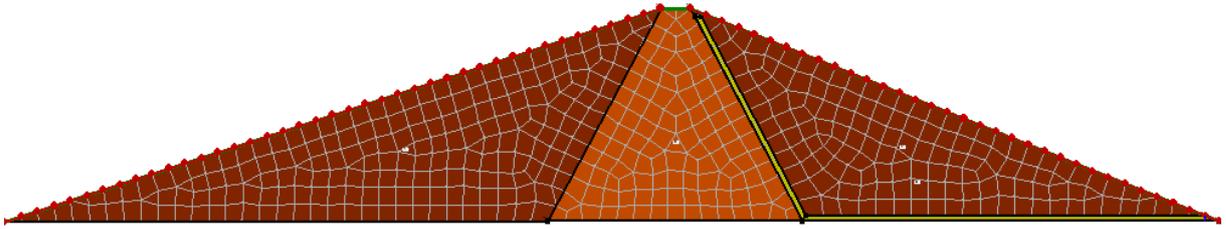
3.2.2. Análise de percolação

Para mensurar a influência da variação do teor de cal e do peso específico aparente seco como mecanismos da hipótese inicial de redução do parâmetro de condutividade hidráulica, foram obtidos resultados de vazão a jusante para distintos modelos de barragem. Quantificação esta, feita através do Modelo de Elementos Finitos utilizando a ferramenta computacional SEEP/W, contido dentro do software GEOSTUDIO.

As observações paramétricas através do SEEP/W, decorrem de análises que consideram o movimento e a distribuição de pressão de água dentro de materiais porosos, podendo este ser um modelo de fluxo saturado ou não saturado. (SANTOS, 2004). Este método é normalmente utilizado para estudo das condições do fluxo em barragens de terra por meio de análises bidimensionais com base nas propriedades aplicadas às seções transversais do maciço. O programa apresenta ferramentas que fornecem como resultados dados sobre linha piezométrica, gradiente de percolação para áreas específicas da seção analisada e ainda a leitura da vazão que passa por uma determinada seção, nó ou elemento finito.

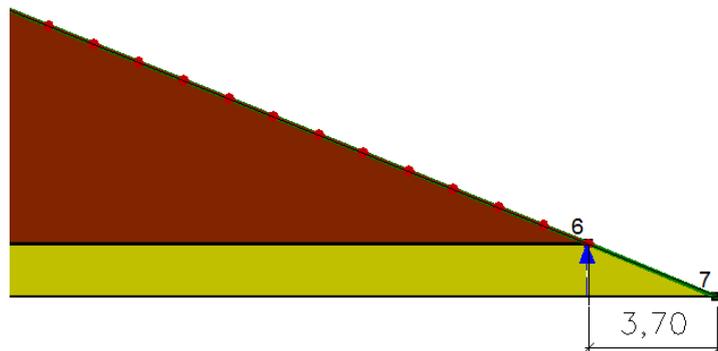
As análises foram limitadas pelas condições inseridas, sendo estas: forma, coeficientes de condutividade hidráulica e nível de água no reservatório. As limitações do software se fizeram pelo fato de haver restrições à versão estudante utilizada, como: na composição do modelo (restrita a três materiais com suas propriedades de condutividade) e a malha de elementos finitos (limitada a 500 elementos finitos). Assim obteve-se uma malha com elementos triangulares e quadriláteros de lado 4,7 metros, como apresenta a Figura 12.

Figura 13: Exemplo de uma malha de elementos finitos



Aplicando as simulações ao SEEP/W com as composições de modelagem descritas na metodologia, foram quantificadas as vazões para a seção escolhida à jusante, através da inserção de uma seção vertical na qual foi mensurada a vazão que à atravessa. A seção definida, 3,7 metros da extremidade do talude jusante, estando inserida ao elemento finito que está mais jusante do modelo. A representação da seção se faz na Figura 13, ilustrando a sua alocação padrão a todos os modelos simulados.

Figura 14: Seção que quantifica a vazão que por ela atravessa



3.2.3. Variáveis pesquisadas

- **Variáveis fixadas**

Para solução e aplicação dos dados no modelo dos elementos finitos, foram fixadas variáveis que são apresentadas no Quadro 1. Sendo estas variáveis dimensões e geometria da barragem e espessura de filtro fixas; ainda estabeleceu-se uma barragem com fundação em rocha impermeável, de modo que restrinja as análises à percolação ao maciço. Sendo a composição inicial de 75% Solo Residual de Arenito Botucatu + 25% de Resíduo de Britagem do Basalto, com umidade de compactação de 14%, seguindo estudos precedentes a Benetti, (2015), também a cal como aditivo adicionado em porcentagem ao solo como material aglomerante, com dados resultantes de um tempo de cura de 28 dias.

E para o MEF utilizou-se uma malha com elemento triangulares e quadriláteros, com sua dimensão de lado em metros de 4,7 metros correspondente à máxima de 500 elementos.

Quadro 1: Variáveis fixadas

| Variáveis | Unidade | Níveis |
|---------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Dimensões e formato da barragem | - | Conforme a Figura 11 |
| Dimensão do filtro vertical | - | Espessura de 1,5 metros |
| Dimensão do filtro horizontal | - | Espessura de 1,5 metros |
| Tipo de fundação | - | Impermeável (rocha) |
| Umidade de compactação do núcleo | % | 14 |
| Umidade de compactação do corpo da barragem | % | 14 |
| Nível d'água no reservatório | m | 55 |
| Tipo de solo do núcleo | - | Solo Residual de Arenito Botucatu + 25 % Resíduo da Britagem do Basalto+ Teor de cal. |
| Tipo de solo do corpo da barragem | - | Solo Residual de Arenito Botucatu +25% Resíduo da Britagem do Basalto. |
| Tipo de aditivo | - | Cal |
| Material do filtro | - | Areia média ($k_{20}=10^{-4}$ m/s) |
| Comprimento do lado de cada elemento finito | m | 4,7 |

- **Variáveis controladas**

A Tabela 5 apresenta as variáveis consideradas controláveis na modelagem. Com a variação dos coeficientes de condutividade hidráulica do núcleo, em função da porcentagem de cal e γ_d , na variação do coeficiente de condutividade hidráulica da área externa ao núcleo (generalizada aqui como área do maciço) em função apenas de seu peso específico aparente seco. Ainda com a inserção do núcleo no modelo, tem-se como parâmetro de variação sua forma, que influi na vazão percolada, por tratar-se de uma área com material adicionado de cal restringindo o fluxo na região.

Quadro 2: Variáveis controláveis

| Variáveis | Unidade | Níveis |
|-------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------|
| Coefficiente de condutividade hidráulica (k) do núcleo | m/s | Combinação de diferentes % de cal e γ_d , conforme a Tabela 5. |
| Coefficiente de condutividade hidráulica (k) do corpo da barragem | m/s | Referente a diferentes pesos específicos de solo, conforme Tabela 5 |
| Formato do núcleo | - | Figuras 8, 9 e 10. |

- **Variáveis respostas**

A variável resposta à modelagem é a vazão, parâmetro de saída obtido através das análises no SEEP/W e apresentada na Tabela 6. Oriunda de todas as condições aplicadas e determinadas para as seções transversais, a vazão, em m^3/s (valor resultante no SEEP/W) foi ainda convertida em m^3/dia , para uma avaliação mais objetiva e plausível da amplitude de valores.

Quadro 3: Variáveis respostas

| Variáveis | Unidade | Níveis |
|-----------|---------|-------------------------------------------------------------------|
| Vazão | m^3/s | Resultado da modelagem, através do elemento exposto na Figura 12. |

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a organização dos dados, estes foram separados de acordo com peso específico aparente seco da área externa ao núcleo, para dentro estes dados se provesses as análises referentes ao núcleo, de acordo com a sua forma, γ_d e teor de cal. E ainda avaliar outros aspectos referentes que justificaram os dados obtidos.

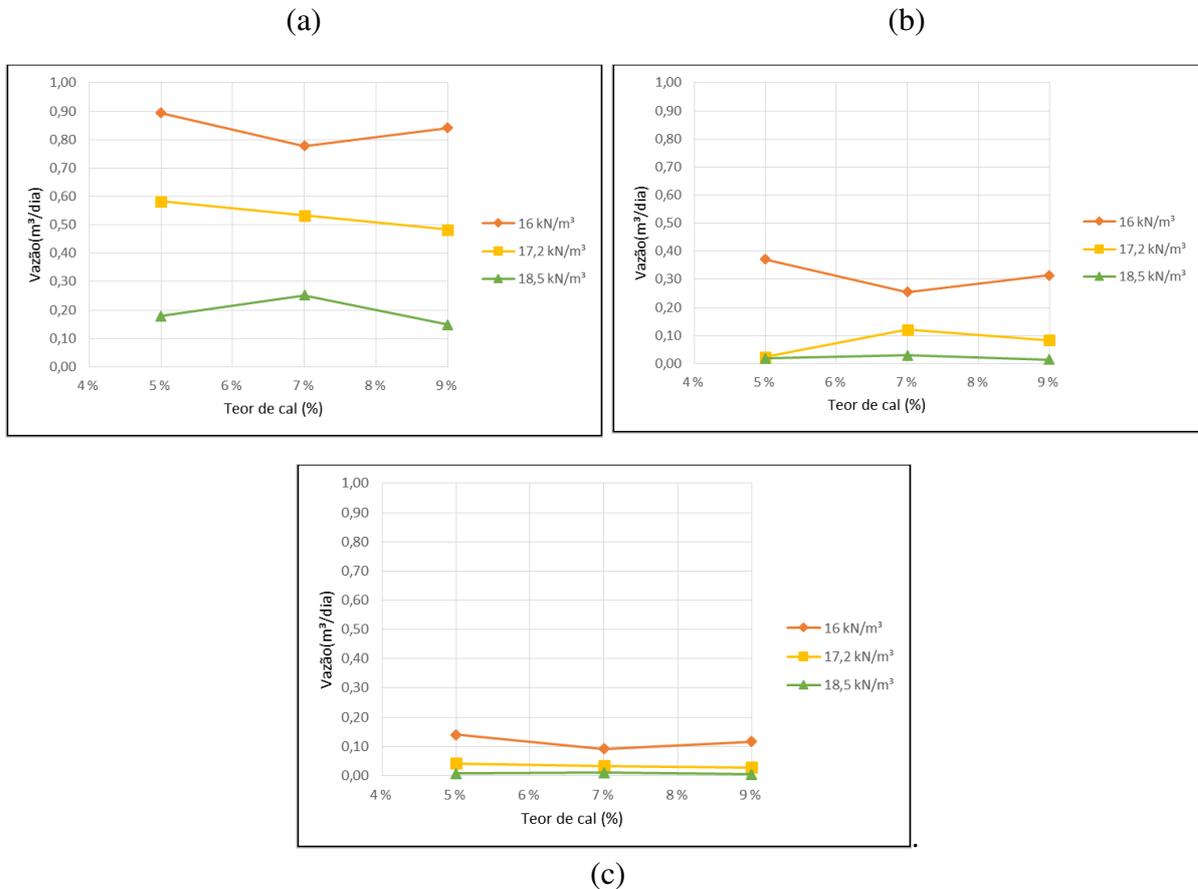
4.1 MACIÇO COM O PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO DE 16 kN/m³

As análises feitas tratam do parâmetro de vazão, de acordo com os dados obtidos da modelagem, e que estão apresentados na Tabela 1 do Apêndice A. Para um maciço com $\gamma_d=16$ kN/m³, com as variações, núcleo com base maior de 20 metros (B= 20 m), núcleo com base maior de 45 metros (B= 45 m) e núcleo com base maior de 70 metros (B= 70 m).

Para análise do teor de cal, é apresentado na Figura 13 a influência da cal em cada seção de núcleo, para distintos pesos específicos aparente seco. Referidas aos dados de vazão, observou-se que o aumento do teor de cal em nenhum dos casos teve um comportamento exclusivamente redutor de percolação, visto que a vazão ou apresenta uma certa constância, ou oscila entre reduções e aumento. Algo que ocorreu de forma similar para os dados de condutividade obtidos por Benetti (2015).

A variação da vazão se deu com o aumento da seção do núcleo. Onde para o mesmo teor de cal, 5 %, mesma peso específico, $\gamma_d=16$ kN/m³ obteve-se para o núcleo de 20 metros 0,894 m³/dia para o de 45 metros 0,372 m³/dia, como pode ser visto na Figura 13 (a) e (b), respectivamente, uma diferença da ordem de 0,5 m³/dia. Um efeito de maior em amplitude do que para um núcleo de 70 metros de base, ao qual se obteve uma redução inferior da ordem de 0,23 m³/dia com relação ao núcleo de 45 metros, como pode ser visto na Figura 13 (c) não havendo uma linearidade entre estas variáveis.

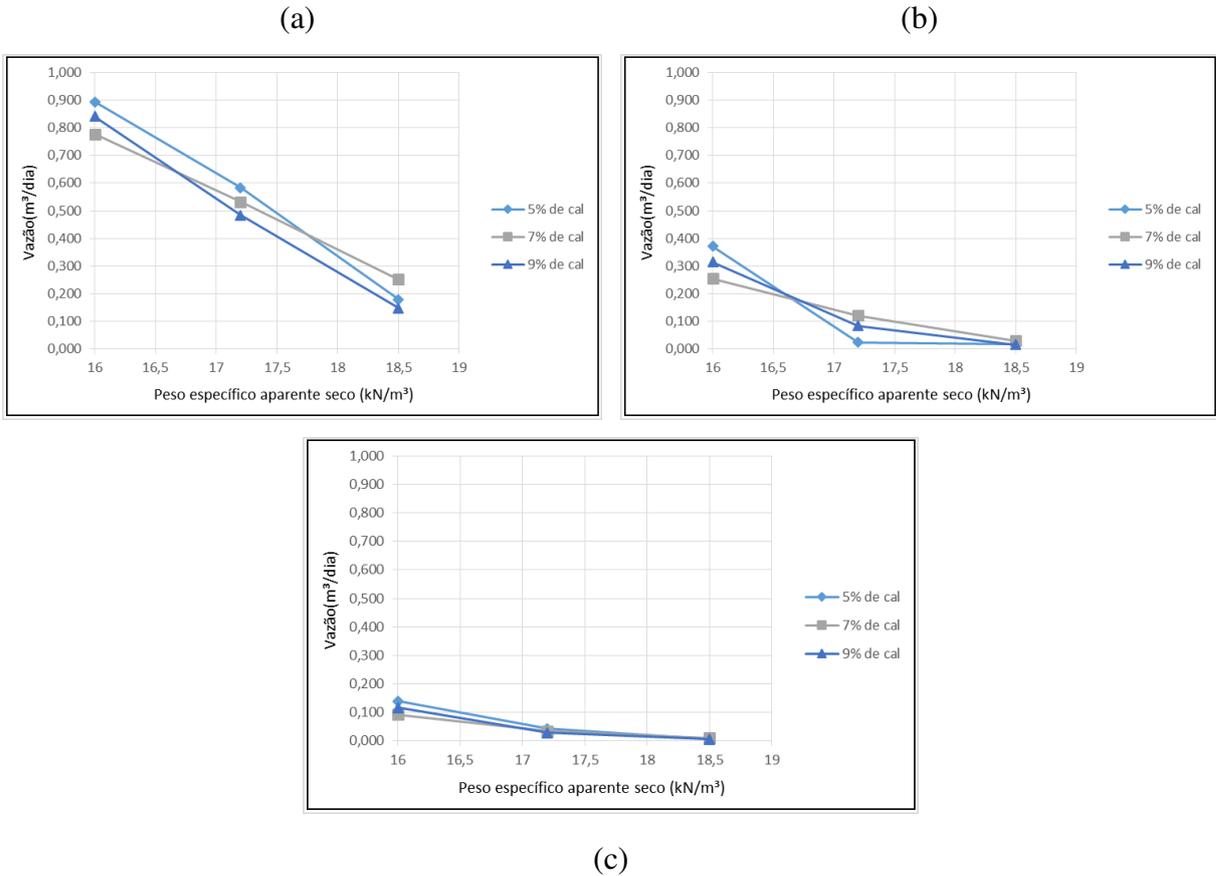
Figura 15: Influência do teor de cal, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$



No tocante da influência do peso específico aparente seco do núcleo, a Figura 14 apresenta o comportamento da vazão de acordo com as dimensões do núcleo e com distintos teores de cal. Apresentando na Figura 14 (a), (b) e (c), um comportamento similar entre as curvas.

Para a vazão, o aumento do peso específico aparente seco do núcleo observado pela Tabela 1 do Apêndice A e ilustrado pela Figura 15, há uma considerável redução da vazão em todas as modelagens, com considerável amplitude de redução para o caso do núcleo de base de 20 metros, com 5 % de cal, como mostra a Figura 15 (a), da ordem $0,714 \text{ m}^3/\text{dia}$. Para núcleos maiores, como de base de 70 metros com apresenta a Figura 15 (c) a variação com o aumento da peso específico é bem menor, sendo para o teor 9% uma variação $0,1 \text{ m}^3/\text{dia}$. Ainda para este teor de cal, com $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$ do núcleo, com 70 metros de base obteve-se a menor vazão de $0,005 \text{ m}^3/\text{dia}$, dentre todas as simulações.

Figura 16: Influência do peso específico aparente seco, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_a = 16 \text{ kN/m}^3$

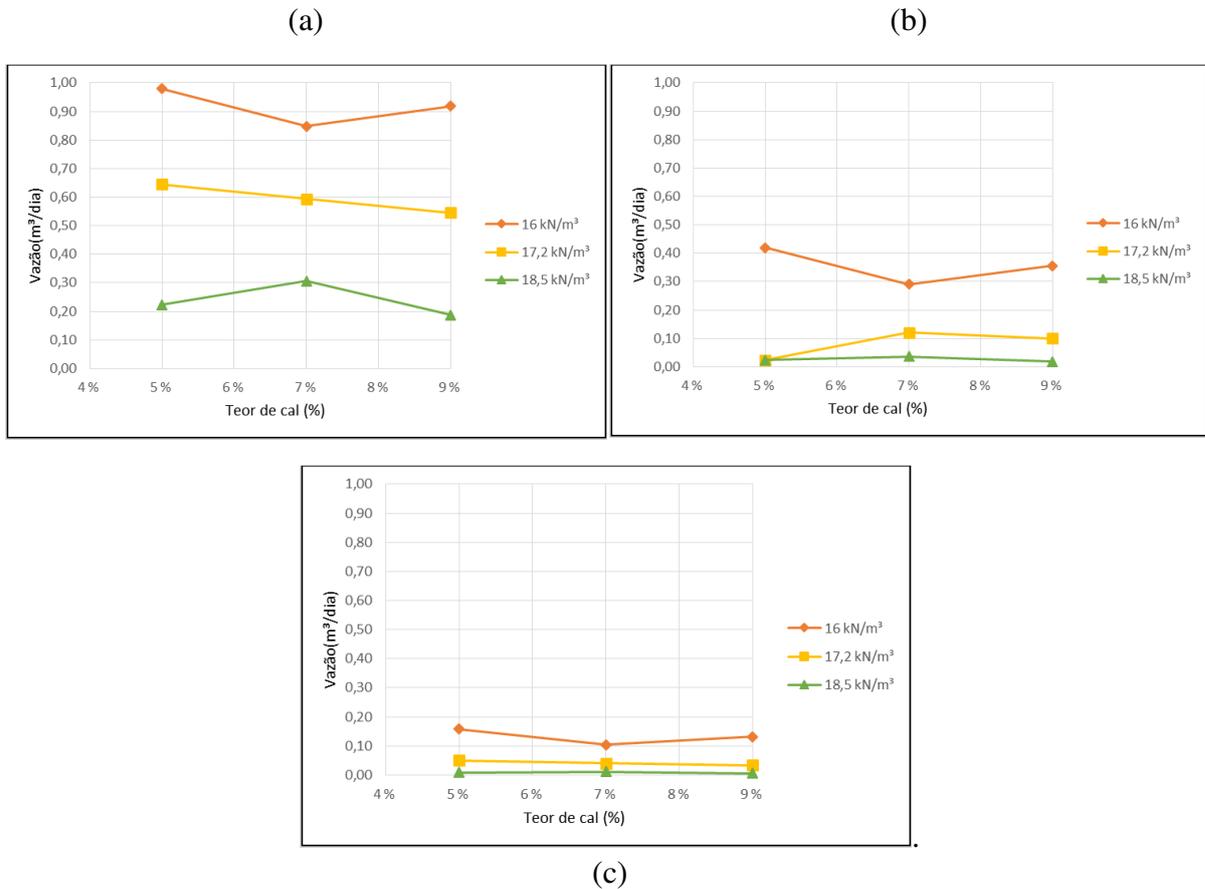


4.2 MACIÇO COM PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO DE 17,2 kN/m³

Seguindo a mesma sequência adotada no item anterior foram alocados os dados com a mudança do peso específico aparente seco da área do maciço com as mesmas seções já indicadas à modelagem, assim obtendo os dados de vazão de presentes na Tabela 2 do Apêndice A.

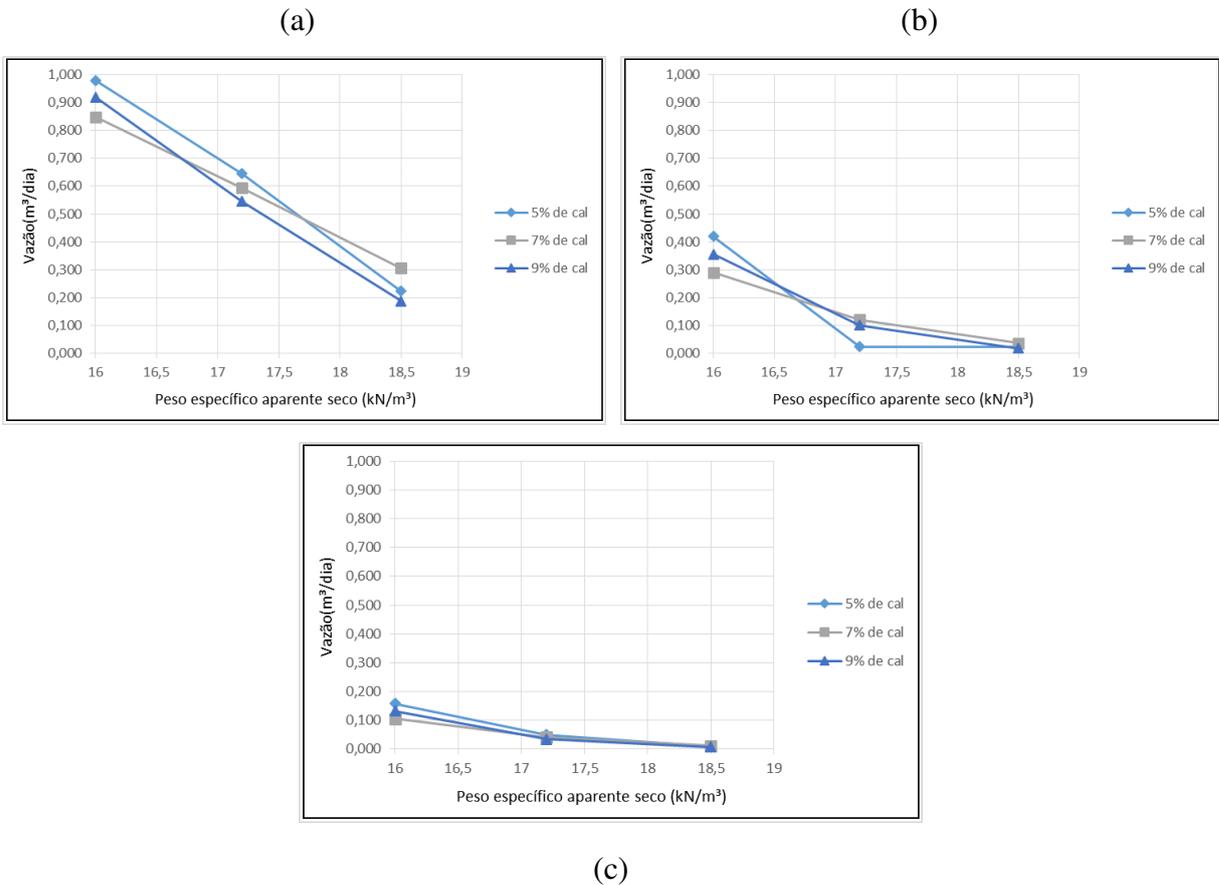
Com os dados de vazão da Tabela 2 do Apêndice A foram construídos os gráficos da Figura 15, que retratam a influência do teor de cal, onde demonstra uma inércia da cal como material aglomerante que aumente as ligações entre partículas, e conduza a redução de fluxo. Ou seja não há indícios de reações pozolânicas, ao que Silvani (2013) se refere como a fase lenta de estabilização, onde há a formação de produtos cimentantes e a carbonatação, mas provavelmente de um processo de floculação, havendo um aumento do diâmetro dos aglomerados do solo e conseqüentemente aumentando a permeabilidade.

Figura 17: Influência do teor de cal, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_d=17,2 \text{ kN/m}^3$



A influência do peso específico aparente seco do núcleo, como expõe a Figura 16 apresenta-se de forma mais efetiva na restrição ao fluxo, em todos os núcleos e para todos os teores de cal, com ênfase para o núcleo de menor seção, como representado na Figura 16 (a) e menor influência para núcleos de maior seção como demonstram as Figuras 16 (b) e (c). A influência do tamanho seção do núcleo dá-se para seções maiores, conduzindo a menores vazões com menor dependência das outras variáveis.

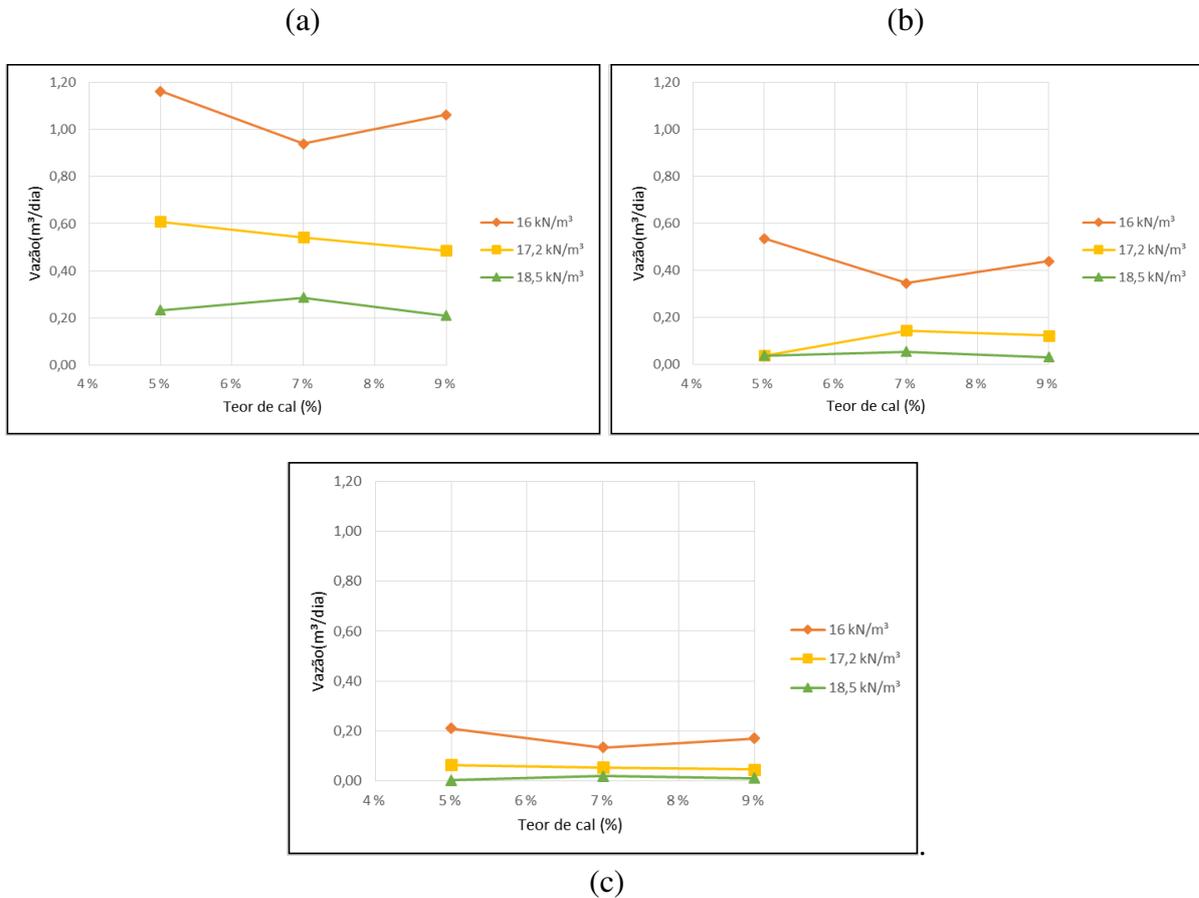
Figura 18: Influência do peso específico aparente seco, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_d=17,2 \text{ kN/m}^3$



4.2 MACIÇO COM PESO ESPECÍFICO APARENTE SECO DE $18,5 \text{ kN/m}^3$

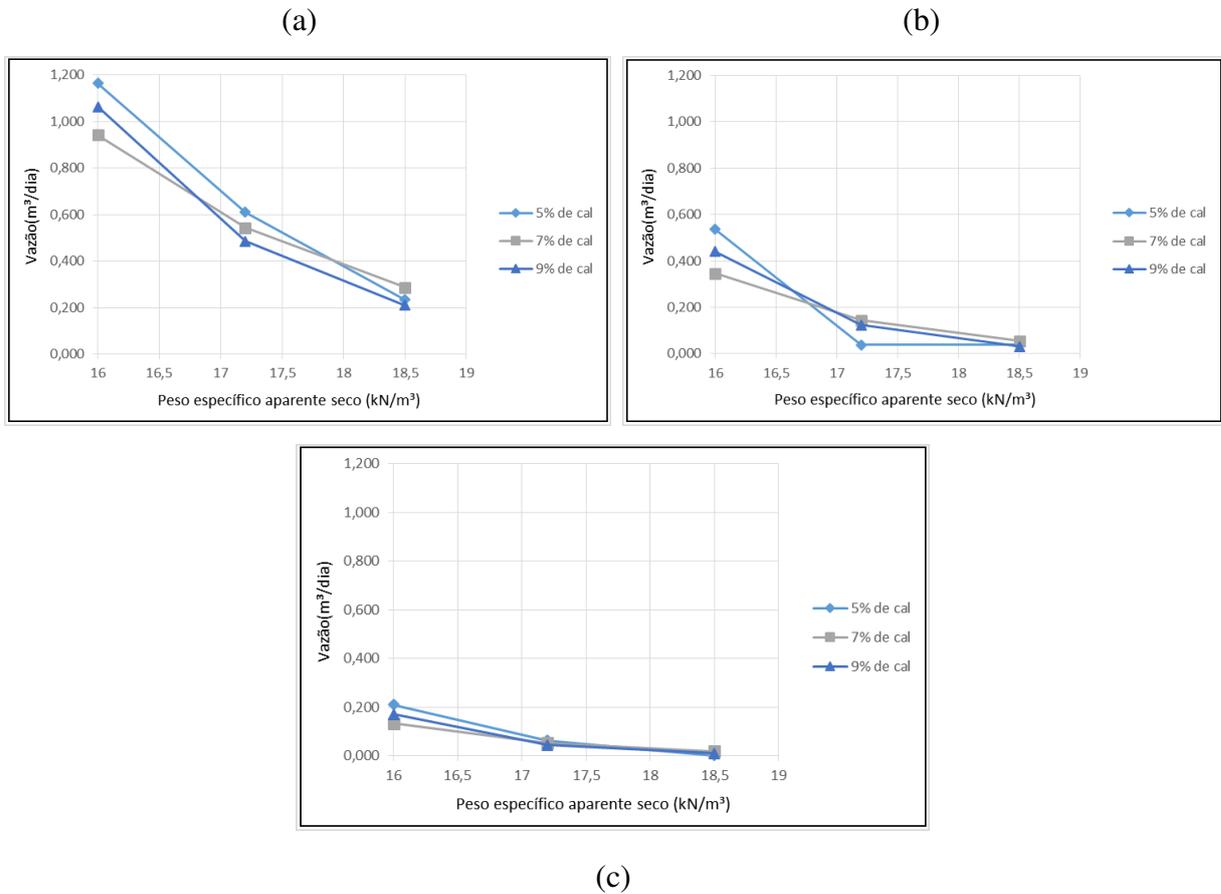
Seguindo a analogia para os anteriores, o $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$, obteve-se dados da influência da cal de forma similar e de peso específico aparente seco com modelagem similares. O teor de cal aplicado ao material do núcleo e sua influência, apresentados na Figura 17, segue o comportamento para as simulações anteriores, sem função direta na redução de percolação. Ainda a Tabela 3 Apêndice A, demonstra para o mesmo teor de cal, mesmo γ_d do núcleo e mesma seção de núcleo valores de vazão sensivelmente maiores do que para os outros tipos de maciços apresentados nas Tabelas 1 e 2 do Apêndice A.

Figura 19: Influência do teor de cal, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_d=18,5 \text{ kN/m}^3$



A influência do γ_d do núcleo, como apresenta a Figura 16 se dá de forma mais ativa, como apresenta a Figura 19 e Tabela 3 do Apêndice A. Observa-se que para o núcleo de menor seção, onde analisando o aumento do peso específico aparente seco do núcleo observou-se uma redução de aproximadamente $1 \text{ m}^3/\text{dia}$ de volume percolado, para a curva de 5% de cal em um núcleo de base $B=20 \text{ m}$. Ressaltando que para núcleos de menor seção, o aumento de γ_d , implicaram consideráveis reduções de maciço, fato apresentado em todos os outros maciços.

Figura 20: Influência do peso específico aparente seco, para o núcleo de base 20 m (a); para o núcleo de base 45 m (b) e núcleo de base 70 m (c) - Maciço de $\gamma_d=18,5 \text{ kN/m}^3$.



4.3. INFLUÊNCIA DA RAZÃO POROSIDADE/TEOR VOLUMÉTRICO DE ADITIVO, NA PERCOLAÇÃO.

Benetti (2015) em sua pesquisa, obteve para o teor volumétrico do material cimentante, o expoente de minoração que melhor se ajusta ao comportamento mecânico e hidráulico da ordem de 0,12, como melhor ajuste aos dados obtidos. Com isso, resulta na formulação de $\eta/L_{iv}^{0,12}$, dados apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3 do Apêndice A e que foram obtidos pela autora.

Assim, aplicando essa metodologia e utilizando os dados de vazão referentes às simulações, dos distintos modelos de núcleo de barragem, associados aos dados da razão $\eta/L_{iv}^{0,12}$ para os dados de coeficientes de condutividade hidráulica (parâmetro de entrada nas simulações) foram obtidos gráficos dessa correlação. De acordo com a variação do peso específico aparente seco da área externa ao núcleo da barragem, com cada curva representando um tamanho de núcleo.

Figura 21: Vazão percolada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL, para uma maciço de $\gamma_d=16 \text{ kN/m}^3$

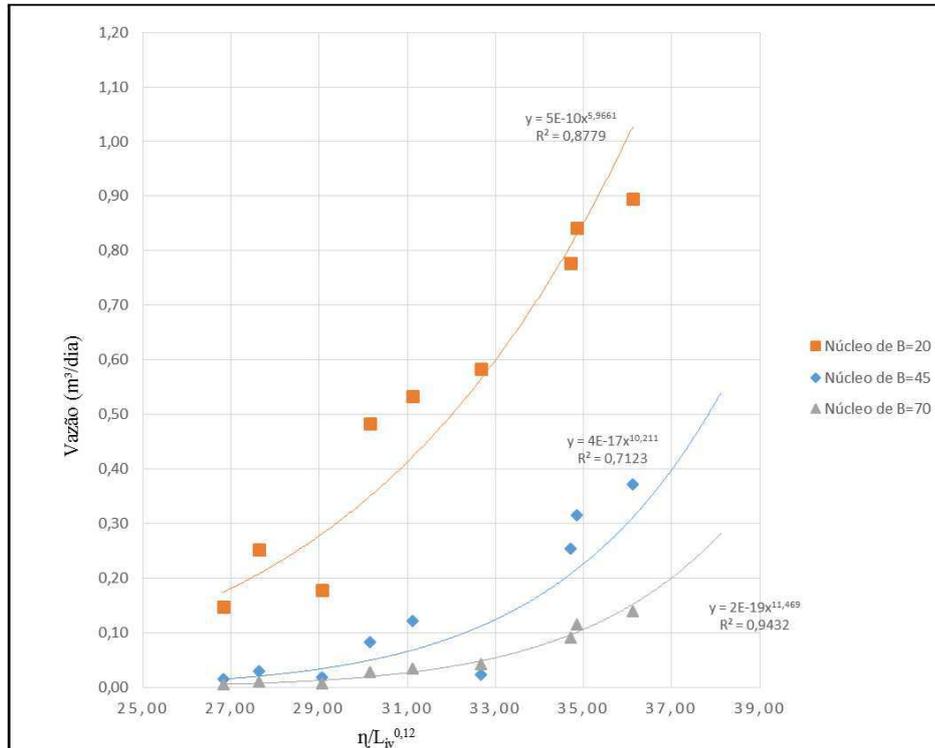


Figura 22: Vazão percolada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL, para uma maciço de $\gamma_d=17,2 \text{ kN/m}^3$

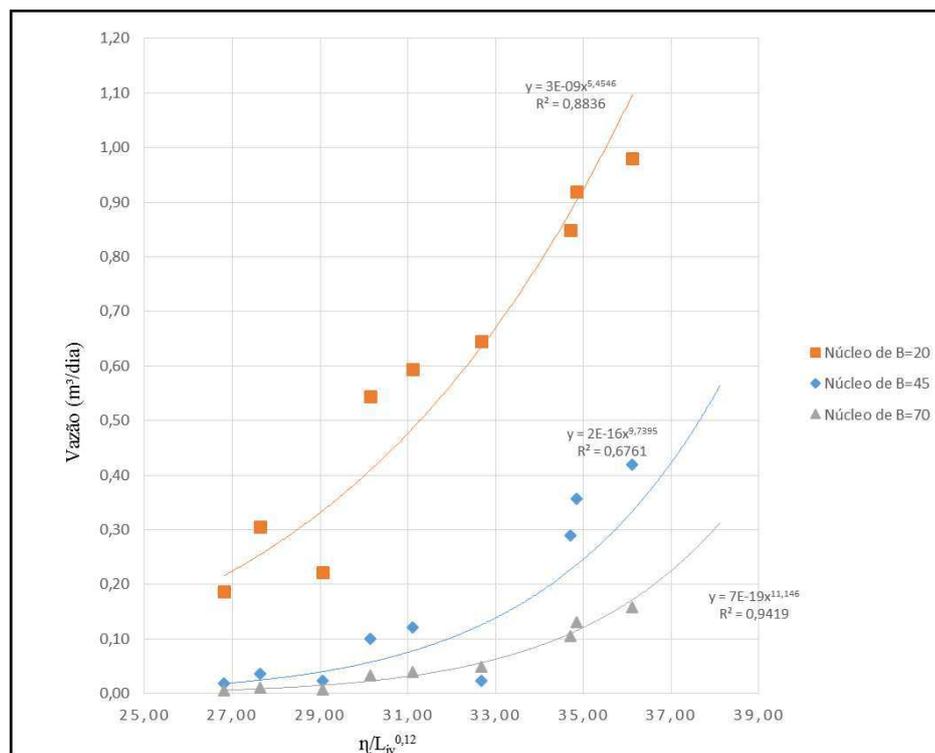
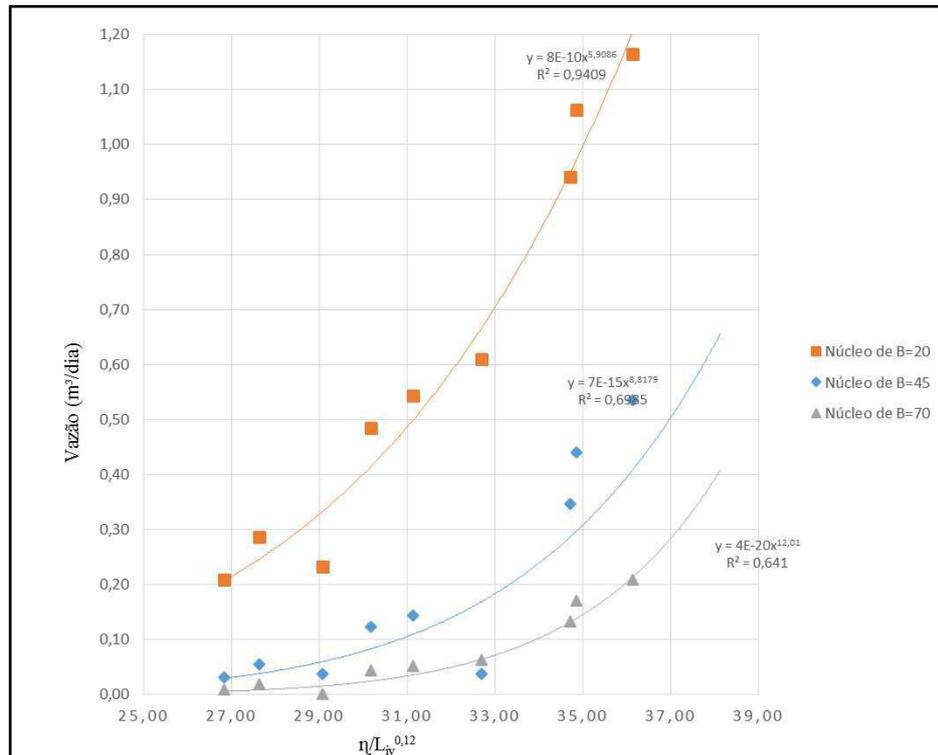


Figura 23: Vazão percolada versus relação vazios/cal ajustado do SRAB-25%RBR-CAL, para uma maciço de $\gamma_d = 18,5 \text{ kN/m}^3$



Para as Figuras 20, 21 e 22 foram obtidas as curvas que correspondem ao núcleo aplicado, podendo observar uma boa correlação entre $\eta/L_{iv}^{0,12}$ e a vazão percolada através do maciço da barragem. Para o ajuste da curva utilizou-se a linha de tendência do tipo potência, a qual apresenta melhores coeficientes de R². No qual quanto mais próximo de 1 maiores as chances de prever as vazões de acordo com as características do material inserido como composição de núcleo e consequentemente de permeabilidade.

Assim o mecanismo de previsão representado nas Figuras 20, 21 e 22 apresenta grande funcionalidade, pois dentro das condições aplicadas a barragem (vazão máxima aceitável ou de acordo com a razão η/L_{iv}), tem-se como prever o comportamento, e assim determinar a seção transversal que tenha melhores resultados atrelados à viabilidade econômica. Assim podendo se otimizar o núcleo pela metodologia η/L_{iv} que faz-se mecanismo útil na viabilidade econômica do processo construtivo do núcleo de uma barragem.

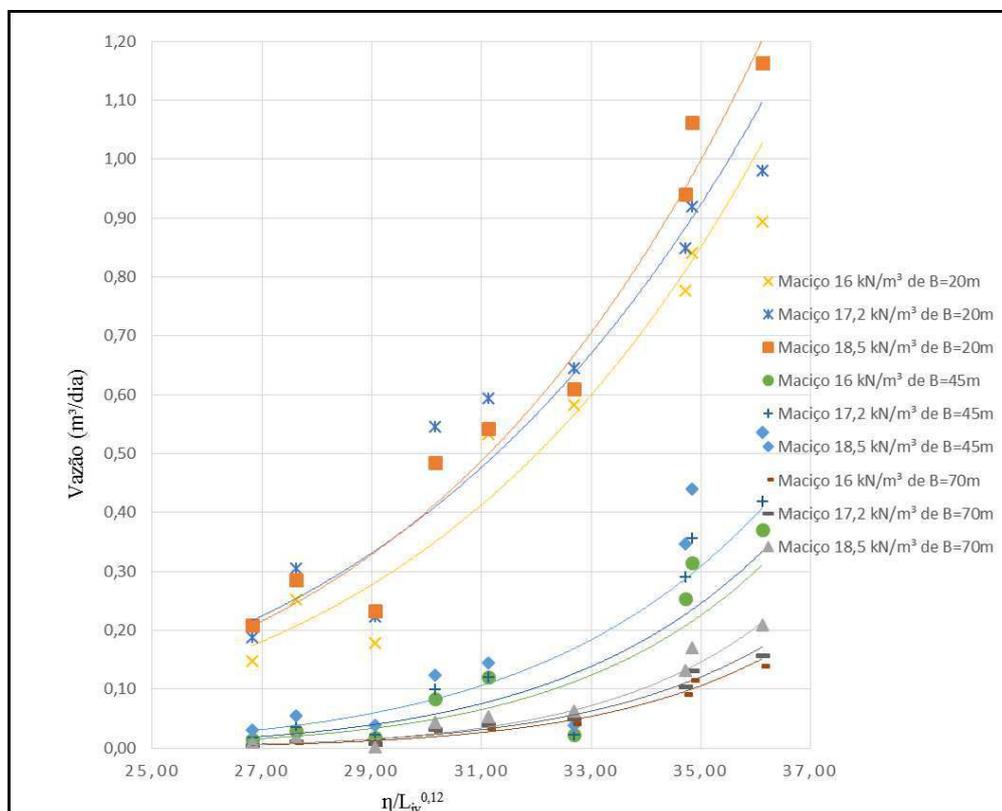
Diante do exposto, observou-se que a porosidade apresenta fundamental importância na redução da vazão, isto é, a porosidade da mistura compactada exerce forte influência sobre a condutividade hidráulica, quanto mais denso, menos poroso, menor índice de vazios e menor a

condutividade (BENETTI, 2016). Logo, para a minimizar as vazões deve-se aplicar ao núcleo um maiores γ_d , levando a menores vazões principalmente a núcleos de menores dimensões.

Outra forma de supressão de vazões, como apresentam as Figuras 20, 21 e 22, é o tamanho da seção do núcleo. Onde para as seções maiores, maior será o trecho de baixa permeabilidade que a água irá percorrer, a redução da área dos poros interligados, conduzindo a redução das vazões percoladas. Ainda segundo as figuras citadas observa-se que quanto maior for essa seção transversal de núcleo menor será a influência em termos de vazão.

No que se refere à área externa ao núcleo, pode-se avaliar pela Figura 23 que não há influência do peso específico aparente seco, visto que as curvas de vazão versus $\eta/L_{iv}^{0,12}$, apresentam agrupamento por tipo de seção de núcleo (que variaram entre três níveis), indicando que o aumento da área transversal do núcleo tem forte influência nas percolações pelo maciço, indicando aspectos característicos. Assim o material do maciço (SRAB-25%RBR), em termos práticos visando economia pode ter uma menor compactidade podendo ser aplicado menores γ_d , que implicam diretamente em menor compactação.

Figura 24: Influência da área externa ao núcleo na vazão.



5. CONCLUSÕES

Ao efeito da cal depreende-se que, quando aplicada como adição nos teores de 5, 7 e 9%, teve efeito mínimo de redução de vazões, não havendo uma real representatividade como material aglomerante que contribuísse para redução dos diâmetros dos poros nos quais a água atravessa.

O aumento do peso específico aparente seco (γ_d) do núcleo representam as reduções mais significativas de vazão, onde estas reduções, em amplitude, deram-se com o aumento de γ_d , principalmente dentro de núcleos de menor dimensão. Aspecto que pode vir a ser explorado de forma prática, pois exigiria um volume menor de mistura solo-aditivo, utilizando a compactação para chegar em condições de maior peso específico aparente seco, gerando consideráveis reduções de vazão. Para a área externa ao núcleo, observou-se que o aumento do peso específico não apresenta representativa influência nas vazões, se comparada com a influência da seção do núcleo. Assim, depreende-se que, assim como na prática, o material correspondente a essa área e seu do peso específico aparente seco não influi nas vazões a jusante.

A forma do núcleo de uma barragem de terra zoneada tem representativa influência dentro do controle de percolações. Assim como foi observado núcleos com maiores seções transversais levam a uma redução direta das vazões, com menor dependência do peso específico aparente seco aplicada a eles. Desta grandes seções transversais associadas a γ_d maiores da ordem de 18,5 kN/m³, conduzem à vazões mínimas.

A razão porosidade/teor volumétrico de cal (η/L_{iv}) é eficaz na otimização do núcleo sendo este associado ao tamanho do núcleo, constrói curvas que indicam a vazão correspondente para estes fatores. Peça chave na razão $\eta/L_{iv}^{0,12}$ a porosidade, é fator preponderante da permeabilidade, quanto menor a porosidade, resulta em vazões menores as construções dos modelos de barragens.

Tal metodologia de otimização apresenta grande potencial, podendo ser aplicado a outros modelos de barragens que possuam núcleos cimentados. Onde, dentro de estudos ao qual se fixe uma vazão de percolação admissível, pode através desta metodologia, atrelada a simulações de distintos tipos de núcleo (em forma, material, teor de aditivo, energia de compactação) otimizar um núcleo que atenda as características regionais da obra.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, Paulo de Tarso Silva. **Modelagem numérica tridimensional visando o estudo de tensões na bacia do recôncavo via método dos elementos finitos**. 2003. 141 p. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

ARAUJO, I. B. **Avaliação da condutividade hidráulica e do transporte de Cu^{2+} em barreiras ambientais compostas por misturas de solo arenoso, cimento e argila**. 2019. , 180 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

ARRIVABENI, Breno Santos. **Alternativas para estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais**. 2017. 53 p. Dissertação (Mestrado) - Curso em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

ARSHAD, Imran; BABAR, Muhammed Muneer. Finite Element Analysis of Seepage through an Earthen Dam by using Geo-Slope (SEEP/W) software. **International Journal of Research (IJR)**, Nova Delhi, v. 1, n. 8, p. 619-634, set. 2014.

ASSIS, A. P.; HERNANDEZ, H. M.; COLMANETTI, J. P. **Apostila de Barragens**. Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

AZAMBUJA, R. M. B. **Comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo-cimento-bentonita para a aplicação em barreiras verticais de contenção de contaminantes**. 2004. 93 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

AZEVÊDO, André Luis C. de. **Estabilização de solos com adição de cal: Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. 2010. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BENETTI, M. **Comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual tratado com cal**. 2015. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BENETTI, M. Estudo da condutividade hidráulica de um solo residual tratado com cal. In: **COBRAMSEG 2016 – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Belo Horizonte, ABMS, 2016.

BENSON, C. H; ZHAI, H. WANG, X. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. **Journal of Geotechnical Engineering**. Vol. 120, Nº 2, p. 366-387, fev. de 1994.

CARRARO, J. A. H. **Utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo residual de arenito**. 1997. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

CASTRO, F. J. C. O. **Um estudo físico químico matemático da estabilização alcalina de solos argilosos**. 1981. 476 p. dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1981.

CEDERGREN, H. R. **Seepage, drainage, and flow nets**. 1977.

CERQUEIRA, Fernando Antônio de. **Modelagem por elementos finitos da associação fluxo e equilíbrio em problemas de engenharia geotécnica**. 2004, 164 p. Dissertação (Mestrado em Informática Aplicada) - Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2004.

DAS, M. B; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. Tradução: Noveritis do Brasil.

DNOCS. **Açude Boqueirão de Cabaceiras**: Barragem Epitácio Pessoa. 1967. Disponível em: <<https://www.dnocs.gov.br/barragens/boqueirao/boqueirao.htm>>. Acesso em: 28 de ago. de 2019.

FIGUEIREDO, L. I. P. S. **Soluções de estabilização hidráulica na barragem de Massingir**. 2017. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Perfil de Geotecnia) - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE NATIONS. **Manual sobre pequenas barragens de terra: guia para localização, projecto e construção**. Roma: FAO, 2011. ISSN 0254-5284.

FOPPA, Diego. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FRANÇA, Eloneide Meneses; GOMES, Carísia Carvalho. Análise da percolação d'água através da fundação da Barragem Castanhão – Ceará. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo, 2007.

GAIOTO, N. **Sistemas de controle de percolação de água em projetos de barragens de terra**. Concurso de Livre-Docência. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

GILBERT GEDEON, P.E. **Design and Construction of Earth and Rock-Fill Dams**. DEPARTMENT OF THE ARMY U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC, 2004.

GOULARTE, C. L.; PEDREIRA, C. L. S. Estabilização química de solo com adição de cimento ou cal como alternativa de pavimento. In: **V Seminário de engenharia geotécnica do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2009.

GUIMARÃES, J.E. P. **A cal – Fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. São Paulo: Pini, 1998.

IBEIRO, L. S. **Estudo da distribuição dimensional de poros e da condutividade hidráulica de solos arenosos compactados tratados com cal e cimento**. 2016. 173 p. Tese (Doutorado em Engenharia) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. 2007. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LOCH, F. C. **Estudo integrado do comportamento de misturas de solo arenoso, argila e cimento para a aplicação em barreiras de proteção ambiental**, 2019. 400 p. Tese de Doutorado (Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2019.

LOPES JUNIOR, Luizmar da Silva. **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal**. 2011. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MACHADO, M. F. C.; MACHADO, S. L. **Apostila de Mecânica do Solos II: conceitos básicos**. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

MARAGON, M. **Apostila de mecânica dos solos II**: capítulo 1- hidráulica dos solos. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

MASSAD, Façal. **Obras de Terra**: curso básico de geotecnia. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MITCHEL, J.; HOPPER, D.; CAMPANELLA, R. Permeability of compacted clay. In: **Journal of soil mechanics and foundations**. 1965, v. 91, 41-65

NATIONAL LIME ASSOCIATION. **Using lime for soil stabilization and modification**: a proven solution. Arlington, Virginia- EUA, 2001.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007.

OZCOBAN, M. S. Permeability and removal rate of compacted clays to organic and inorganic matters. **Journal of scientific & industrial research**. Vol. 67, p. 136-140, Feb. of 2008.

PATRICIO, J. D. **Estudo de solos modificados por adição de polímeros para uso em pavimentos rodoviários**. 2015. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e sim

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

RIBEIRO, Artur. **Avaliação do regime de fluxo e da poropressão de uma barragem alteada para montante**: comparação das observações de campo e da modelagem numérica. 2017. 204 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

ROJAS, J. W. J. **Estudo da resistência, condutividade hidráulica e lixiviação de um solo argiloso cimentado e contaminado**. 2012. 193 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SALDANHA, R. B. CONSOLI, N. C. Accelerated Mix Design of Lime Stabilized Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n.3, p. 1-8, 2016.

SANTOS, Cláudio Rodrigues dos. **Análise paramétrica da infiltração e sua influência na estabilidade de taludes em solo não saturado**. 2004. 118 f. Dissertação

(Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SILVANI, C. **Influência da temperatura de cura no comportamento mecânico de misturas areia-cinza volante-cal.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SILVANI, C. **Solos artificialmente cimentados em célula cúbica: isotropia e pequenas deformações e na ruptura.** 2017. 219 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SILVEIRA, J. D. **Estudo da permeabilidade e estrutura de solo-cal.** 1979. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1979.

SIMÕES DE OLIVEIRA, A. G. **Análise da eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem utilizados em fundações permeáveis de barragem de terra.** 2008. 174 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SOLEYMANI, S.; AKHTARPUR, A. Seepage Analysis for Shurijeh Reservoir Dam Using Finite Element Method. **Geo-frontiers** 2011, [s.l.], p.3227-3234, 11 mar. 2011. American Society of Civil Engineers. [http://dx.doi.org/10.1061/41165\(397\)330](http://dx.doi.org/10.1061/41165(397)330).

TENÓRIO, E. A. G. **Controle da expansão dos solos com resíduo de mármore e cal.** 2019. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

APÊNDICE A

Tabela 1: Dados de vazão de acordo com a dimensão da base do núcleo - Maciço de $\gamma_d=16 \text{ kN/m}^3$

| | | B= 20 m | B= 45 m | B= 70 m | | |
|-------------|----------------------------------------------------|-----------------------------|---------|---------|----------------------|--|
| Teor de cal | Peso específico aparente seco (kN/m ³) | Vazão (m ³ /dia) | | | $\eta/L_{iv}^{0,12}$ | |
| 5% | 16 | 0,894 | 0,372 | 0,139 | 36,12 | |
| | 17,2 | 0,583 | 0,023 | 0,042 | 32,68 | |
| | 18,5 | 0,178 | 0,018 | 0,007 | 29,06 | |
| 7% | 16 | 0,778 | 0,254 | 0,091 | 34,71 | |
| | 17,2 | 0,533 | 0,121 | 0,034 | 31,12 | |
| | 18,5 | 0,252 | 0,029 | 0,009 | 27,62 | |
| 9% | 16 | 0,841 | 0,315 | 0,116 | 34,84 | |
| | 17,2 | 0,483 | 0,083 | 0,028 | 30,15 | |
| | 18,5 | 0,148 | 0,015 | 0,005 | 26,82 | |

Tabela 2: Dados de vazão de acordo com a dimensão da base do núcleo - Maciço de $\gamma_d=17,2 \text{ kN/m}^3$

| | | B= 20 m | B= 45 m | B= 70 m | | |
|-------------|----------------------------------------------------|-----------------------------|---------|---------|----------------------|--|
| Teor de cal | Peso específico aparente seco (kN/m ³) | Vazão (m ³ /dia) | | | $\eta/L_{iv}^{0,12}$ | |
| 5% | 16 | 0,980 | 0,419 | 0,157 | 36,12 | |
| | 17,2 | 0,645 | 0,023 | 0,049 | 32,68 | |
| | 18,5 | 0,223 | 0,023 | 0,008 | 29,06 | |
| 7% | 16 | 0,848 | 0,290 | 0,105 | 34,71 | |
| | 17,2 | 0,594 | 0,121 | 0,040 | 31,12 | |
| | 18,5 | 0,306 | 0,036 | 0,011 | 27,62 | |
| 9% | 16 | 0,919 | 0,356 | 0,131 | 34,84 | |
| | 17,2 | 0,545 | 0,100 | 0,033 | 30,15 | |
| | 18,5 | 0,187 | 0,018 | 0,006 | 26,82 | |

Tabela 3: Dados de vazão de acordo com a dimensão da base do núcleo - Maciço de $\gamma_d=18,5 \text{ kN/m}^3$

| | | B= 20 m | B= 45 m | B= 70 m | |
|-------------|----------------------------------------------------|-----------------------------|---------|---------|----------------------|
| Teor de cal | Peso específico aparente seco (kN/m ³) | Vazão (m ³ /dia) | | | $\eta/L_{iv}^{0,12}$ |
| 5% | 16 | 1,164 | 0,536 | 0,209 | 36,12 |
| | 17,2 | 0,610 | 0,038 | 0,063 | 32,68 |
| | 18,5 | 0,233 | 0,038 | 0,001 | 29,06 |
| 7% | 16 | 0,940 | 0,347 | 0,133 | 34,71 |
| | 17,2 | 0,543 | 0,145 | 0,053 | 31,12 |
| | 18,5 | 0,286 | 0,055 | 0,018 | 27,62 |
| 9% | 16 | 1,063 | 0,440 | 0,170 | 34,84 |
| | 17,2 | 0,485 | 0,123 | 0,044 | 30,15 |
| | 18,5 | 0,209 | 0,031 | 0,010 | 26,82 |