

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LAURO LUIZ FONTOURA FILHO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PH DA ÁGUA, GRAU, UMIDADE E FORMA DE
COMPACTAÇÃO NO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE UM SOLO DO
MUNICÍPIO DE ALEGRETE-RS**

**Alegrete
2019**

LAURO LUIZ FONTOURA FILHO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PH DA ÁGUA, GRAU, UMIDADE E FORMA DE
COMPACTAÇÃO NO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE UM SOLO DO
MUNICÍPIO DE ALEGRETE-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Diego Arthur Hartmann

Coorientador: Jaelson Budny

**Alegrete
2019**

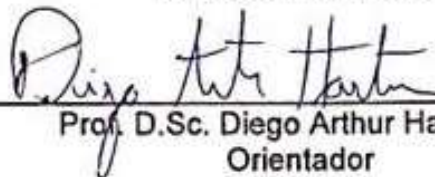
LAURO LUIZ FONTOURA FILHO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PH DA ÁGUA, GRAU, UMIDADE E FORMA DE
COMPACTAÇÃO NO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE UM SOLO DO
MUNICÍPIO DE ALEGRETE-RS**


Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29 de novembro de
2019.

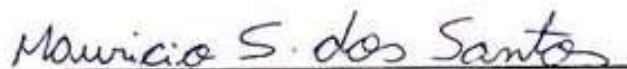
Banca examinadora:



Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann
Orientador
Unipampa



Prof. D.Sc. Jaleson Budny
Coorientador
Unipampa



Prof. Me. Mauricio Silveira dos Santos
Unipampa



Prof. D.Sc. Diego de Freitas Fagundes
FURG

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus.

A minha família, em especial aos meus pais, Lauro e Alexandra, e meu irmão Lucas, por sempre terem me incentivado, tornado possível, e darem forças para chegar até aqui.

Aos meus orientadores, Dsc. Diego Hartmann e Dsc. Jaelson Budny, por toda a dedicação, conhecimento compartilhado e disponibilidade, tanto durante as disciplinas da graduação, quanto na elaboração deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Solos e Pavimentação, Jarbas Dalcin e Juliano Duarte, e a colega de pesquisa Paola, pela ajuda durante a realização dos ensaios.

Ao Fabiano Oliveira, pela parceria durante todo o curso, divisão desta pesquisa, e ajuda durante a realização deste, e tantos outros trabalhos ao longo da graduação.

Ao Anselmo, Davi, e Rafael, os quais conheci e compartilhei a estadia durante o curso, pelos momentos de descontração e parceria criada aqui.

E a todos outros amigos, que de alguma forma ajudaram, e contribuíram para tornar mais leve esta caminhada.

RESUMO

A permeabilidade dos solos é de grande importância para diversos tipos de obras de engenharia geotécnica, dentre elas as barragens de terra são uma das construções que se tem maior dependência deste parâmetro. Na região oeste do estado Rio Grande do Sul, barragens de terra são encontradas em abundância devido à alta dependência desta região da agricultura. Buscando contribuir com a construção de barragens mais seguras, este trabalho tem o intuito de avaliar a influência do pH da água, grau, umidade e forma de compactação na permeabilidade de um solo areno-argiloso do município de Alegrete-RS. Este solo foi submetido a ensaios de permeabilidade, através de permeômetros de parede rígida do tipo molde de compactação. Foram moldados um total de 24 permeômetros, distribuídos ao longo da curva de compactação, e compactados de forma dinâmica e estática. Além disso estão sendo realizados ensaios de permeabilidade percolando-se água com três diferentes fertilizantes, o calcário, a ureia, e o superfosfato triplo, para a avaliação da influência do pH da água na permeabilidade do solo. A partir deste estudo foi possível constatar a variação da permeabilidade com o aumento da umidade de compactação, onde os menores valores de permeabilidade encontraram-se em teores de umidade a partir da umidade ótima. Também foi possível observar diferenças no comportamento e valores da permeabilidade entre os dois métodos de compactação. Esta diferença no comportamento constatada, pode ser explicada pelas diferentes formas de estrutura gerada em solos argilosos frente a diferentes umidades e formas de compactação. Isto pode ser constatado por pontos de mesmo índice de vazios, situados em ramos diferentes da curva de compactação, e por pontos de mesmo índice de vazios e umidade de compactação, mas em diferentes métodos, os quais apresentam valores completamente distintos entre si. Com os resultados obtidos, foram ainda realizadas simulações de modelos de barragens. Onde foi observada a possibilidade de utilizar outras configurações de umidade de compactação, além da umidade ótima, com um bom desempenho em relação a vazão.

Palavras-chave: Permeabilidade dos solos. Solos compactados. Barragens de terras.

ABSTRACT

The soil permeability is of great importance for various types of geotechnical engineering constructions, the earth dam is one of this construction that is most dependent on this parameter. In the west region of the state of Rio Grande do Sul, dams are found in abundance due to this region's high dependence on agriculture, which demands a lot of water. In order to contribute to the construction of safer dams, this research aims to evaluate the influence of water pH, degree, water content and compaction method in a clayey-sand soil of the city of Alegrete-RS permeability. This soil was submitted to permeability tests, through rigid wall permeameters compaction-mold type. A total number of 24 specimens, and under a range of water contents, compacted by dynamic and static method, were subjected to permeability test. Also, permeability tests are being performed by percolating water with three different fertilizers, the limestone, the urea, and the triple superphosphate, to evaluate the influence of water pH on permeability. In this search it was possible to verify the permeability change with the addition of compaction's water content, where smaller permeability values were found for optimum to greater values of water content. Also, it was possible to observe differences in the permeability behavior between the two compaction methods. The permeability behavior verified, can be explained by the differences in the soil structure generated in clay soils by the different compaction method and water content. This can be observed by comparing samples with identical void ratios, but with different dry unit weight, and samples with identical void ratios and water content, but compacted through different methodologies, which presented distinct permeability coefficients. With the results obtained, simulations of dam models were performed. Where it was observed the possibility of using other water content settings, besides the optimum water content, with a good performance in relation to the flow.

Keywords: Compacted soil. Soil permeability. Earth dams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Experimento de Darcy.....	16
Figura 2 - Curva característica de compactação.....	20
Figura 3 - Curvas típica de solos brasileiros.....	21
Figura 4 - Curva de compactação em função da energia aplicada.....	22
Figura 5 - Estrutura de um solo compactado.....	23
Figura 6 - Comportamento do coeficiente de permeabilidade em função da umidade.	24
Figura 7 - Tendência de variação do coeficiente de permeabilidade com a umidade e a densidade de compactação.....	24
Figura 8 - Influência do método de compactação na estrutura do solo.....	27
Figura 9 - Dupla camada difusa.....	28
Figura 10 – Fluxograma da sequência de ensaios.....	33
Figura 11 – Local da coleta do solo.....	34
Figura 12 - Ensaios de análise granulométrica.....	36
Figura 13: Ensaio de massa específica.....	36
Figura 14: Ensaios de Limite de Liquidez e Plasticidade.....	37
Figura 15 - Curva granulométrica.....	37
Figura 16 - Molde de compactação.....	39
Figura 17 - Equipamento para compactação estática.....	40
Figura 18: Compactação estática.....	40
Figura 19 – Célula de permeabilidade.....	41
Figura 20 – Sequência de montagem da célula do permeâmetro.....	42
Figura 21 – Permeômetros montados.....	42
Figura 22 – Permeômetro utilizado.....	44
Figura 23 - PHmetro utilizado.....	45
Figura 24 - Modelo simulado.....	46
Figura 25 - Curva de compactação dinâmica.....	47
Figura 26 - Curva de permeabilidade para o método dinâmico.....	48
Figura 27 - Índice de vazios x coeficiente de permeabilidade, na compactação dinâmica.....	50
Figura 28 - Curva de compactação estática.....	51
Figura 29 - Curva de permeabilidade para o método estático.....	52

Figura 30 - Curvas de permeabilidade sobrepostas.....	53
Figura 31 - Índice de vazios x Coeficiente de permeabilidade	54
Figura 32 - Curva de permeabilidade com adição de calcário.....	55
Figura 33 - Barragem 1: homogênea, umidade ótima.....	56
Figura 34 - Barragem 2: Homogênea, umidade 15% acima da ótima.....	57
Figura 35 - Barragem 3: Zoneada, núcleo na umidade ótima e taludes 1,5% abaixo.	58
Figura 36 - Barragem 4: zoneada, núcleo com umidade 1,5% acima da ótima, e taludes, 1,5% acima.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade.	17
Tabela 2 - Energias de compactação padronizadas.	22
Tabela 3 - Valores de pH encontrados em barragens brasileiras.....	29
Tabela 4 - PH de fertilizantes em água.	30
Tabela 5 – Dosagem do pH da solução utilizada.	35
Tabela 6 - Porcentagem de materiais.	38
Tabela 7 - Limites de Atterberg e Índices.....	38
Tabela 8 - Dados de entrada no Geostudio.	46
Tabela 9 - Densidade seca e coeficiente de permeabilidade na compactação dinâmica.....	48
Tabela 10 - Densidade seca e coeficiente de permeabilidade na compactação estática.....	52
Tabela 11 - Vazões das simulações.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

PH – Potencial Hidrogeniônico

SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos

TRB - Transportation Research Board

ρ_d – Densidade aparente seca

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos específicos.....	14
1.2 Estrutura do trabalho	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Permeabilidade dos solos	16
2.1.1 Fatores que influenciam a permeabilidade dos solos	17
2.1.2 Determinação do coeficiente de permeabilidade em laboratório.....	18
2.2 Compactação de solos.....	19
2.2.1 Fatores que influenciam na compactação	21
2.2.1.1 Tipo de solo	21
2.2.1.2 Energia de compactação	21
2.2.2 Efeito da compactação na permeabilidade.....	23
2.2.3 Formas de compactação.....	25
2.2.3.1 Compactação dinâmica	25
2.2.3.2 Compactação estática.....	26
2.3 Interação química solo-água.....	27
2.3.1 Química das argilas	28
2.3.2 Potencial hidrogeniônico.....	28
2.3.3 Influência do pH na permeabilidade	30
2.4 Barragens de terra.....	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 Materiais.....	33
3.1.1 Solo.....	33
3.1.2 Água e fertilizantes.....	34
3.2 Métodos	35
3.2.1 Caracterização do solo	35
3.2.2 Ensaio de compactação dinâmica.....	38
3.2.3 Ensaio de compactação estática	39
3.2.4 Ensaio de permeabilidade	41
3.2.5 Ensaio de permeabilidade em diferentes níveis de pH.....	44
3.2.6 Simulação de barragens	45

4 RESULTADOS	47
4.1 Influência do grau e umidade de compactação na permeabilidade do solo	47
4.2 Influência do modo de compactação na permeabilidade do solo	50
4.3 Influência do pH da água na permeabilidade	54
4.4 Análise da vazão em barragens com diferentes umidades de compactação	55
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
5.1 Conclusões	60
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	60
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da permeabilidade dos solos é necessário para poder estimar o fluxo de água em seu interior, que é um fator importante para diversos tipos de problemas da engenharia, como o recalque de fundações e aterros, o cálculo de vazões e estabilidade à percolação da água em barragens de terra. Segundo a FAO (2011), a percolação na estrutura das barragens é sempre um potencial problema que deve ser previsto no seu dimensionamento.

Além de obras de grande contribuição para a sociedade, as barragens são construções de grandes riscos ambientais e financeiros, podendo em caso de acidentes levar a inúmeras vítimas fatais quando localizadas próximas a civilizações. Como exemplo destes riscos, no Brasil recentemente dois grandes acidentes em barragens ocorreram no estado de Minas Gerais, um na cidade de Brumadinho e outro em Mariana, e causaram um grande número de vítimas fatais, desde funcionários da gestora destas barragens até pessoas moradoras de vilarejos a quilômetros delas.

Para um bom desempenho em relação à permeabilidade em barragens de terra, utilizam-se solos finos compactados, como argilas. A compactação do solo é um fator que tem grande relevância na permeabilidade do mesmo. Rahman (2000) diz que a compactação é o processo de aplicação de energia mecânica ao solo a fim de torná-lo mais denso. E este processo altera a estrutura do solo, alterando muito a permeabilidade do mesmo. Ainda segundo Rahman (2000) diversos fatores da compactação podem causar variações na permeabilidade, como: umidade, forma de compactação e grau de saturação da moldagem.

Além de fatores do processo de construção de uma barragem, como a compactação, fatores como características químicas do fluido que à percola, podem também causar variações na permeabilidade. Segundo Ferreira (2012), a busca por ganhos de produtividade na agricultura brasileira, tem feito com que o uso de fertilizantes e agrotóxicos cresça rapidamente, como mostram dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Estes produtos em pequenas quantidades podem alterar significativamente propriedades químicas da água. As argilas não são materiais quimicamente inertes, ou seja, quando expostas em soluções químicas, podem apresentar mudanças de comportamentos. Segundo Mesri e Olson (1971), variáveis físico-químicas levam a significativas variações no

coeficiente de permeabilidade, pois estas controlam a tendência da argila a se dispersar ou flocular, diminuindo e aumentando a permeabilidade respectivamente.

Através deste trabalho objetiva-se estudar o comportamento do coeficiente de permeabilidade de um solo areno-argiloso do município de Alegrete-RS, em função da umidade, grau e forma de compactação e também avaliar este parâmetro quando percolada água em diferentes níveis de pH, com a aplicação de calcário, ureia e superfosfato triplo.

A avaliação do coeficiente de permeabilidade à água em diferentes pHs através da adição de fertilizantes tem como objetivo avaliar uma situação de alteração no pH da água que pode ocorrer em campo, em que os fertilizantes que são despejados no solo, podem acabar em contato com a água de barragens.

Já a análise da permeabilidade em diferentes graus, umidades e forma de compactação, tem como justificativa o baixo controle da execução da compactação em campo, principalmente em obras de pequeno porte, como barramentos para fins agrícola, que existem em números expressivos na região do solo estudado. E também o fato de que neste tipo de obra normalmente não são utilizados equipamentos que são representados em laboratório, e sim o que se tem à disposição.

1.1 Objetivos específicos

1. Verificar a influência da umidade e grau de compactação do solo no seu coeficiente de permeabilidade;
2. Verificar a influência do pH da água no coeficiente de permeabilidade do solo;
3. Comparar os valores de permeabilidade de um solo compactado dinamicamente e de um de mesma massa específica compactado estaticamente.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, dispostos com a seguinte organização e conteúdo:

- Capítulo 1: Introdução, onde estão apresentados, a contextualização, os objetivos e as justificativas da pesquisa.

- Capítulo 2: Revisão bibliográfica, onde encontra-se o embasamento teórico encontrado na literatura à cerca dos tópicos do trabalho, permeabilidade, compactação e interação química solo-água.
- Capítulo 3: Materiais e métodos, onde são caracterizados os materiais utilizados, e descritos todos os procedimentos utilizados para a realização dos experimentos.
- Capítulo 4: Apresentação e análise dos resultados, onde estão dispostos os resultados dos experimentos realizados, juntamente com a discussão sobre estes resultados obtidos.
- Capítulo 5: Conclusões e sugestões: onde são apresentadas as considerações finais e sugestões para ampliações e melhoras na pesquisa em trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos e estudos realizados, relacionados ao tema da pesquisa, para o embasamento teórico da mesma.

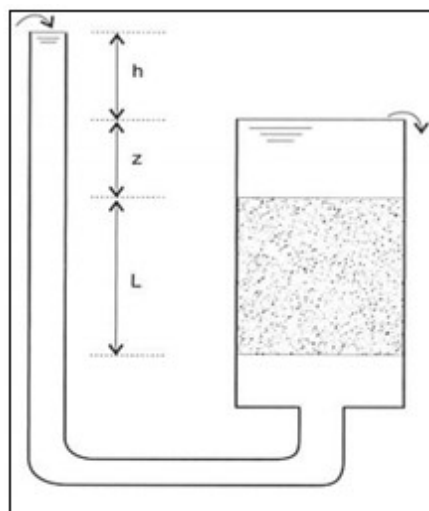
2.1 Permeabilidade dos solos

É bastante comum que a água ocupe grande parte dos vazios do solo, e quando esta é exposta a diferença de cargas, desenvolve-se fluxo de água no interior do solo, provocando alterações no estado de tensões do maciço (PINTO, 2006).

O coeficiente de permeabilidade dos solos expressa a capacidade do mesmo de possibilitar a passagem de água por seu interior, onde o coeficiente de permeabilidade (k) expressa quão facilitada é a percolação, comumente apresentado em cm/s (CAPUTO, 1988).

Segundo Lambe e Whitman (1969), a base do estudo da determinação do coeficiente de permeabilidade vem de Darcy em 1850, que estudou fatores geométricos que influenciam na vazão que passa no interior de um meio poroso. Uma versão de seu experimento é mostrada na Figura 1.

Figura 1 - Experimento de Darcy.



Fonte: Pinto (2006).

Segundo Pinto (2006), através deste experimento chegou-se na Equação 1:

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

Onde:

Q - Vazão (cm³/s);

k - Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

h - Diferença de potencial (cm);

L - Comprimento da amostra (cm);

A - Área do permeâmetro (cm²).

A Equação 1 ficou conhecida como Lei de Darcy, após inúmeros destes experimentos ficou comprovado que a lei de Darcy descreve a permeabilidade para a maioria dos solos e fluidos, porém não descreve o fluxo em altas velocidades onde o mesmo se comporta de maneira turbulenta. A velocidade máxima que ela descreve é relacionada ao número de Reynolds, que diz se o comportamento do fluido se dá de maneira laminar ou turbulenta (LAMBE e WHITMAN, 1969). Como em solos finos a percolação é lenta a lei de Darcy descreve o comportamento da permeabilidade do solo utilizado neste trabalho.

Pinto (2006) apresenta a Tabela 1, com valores representativos de coeficiente de permeabilidade(k) para diferentes tipos de solos.

Tabela 1 - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade.

Tipo de solo	k(m/s)
argilas	1,0E-09
siltos	1,0E-06 a 1,0E-09
areias argilosas	1,0E-07
areias finas	1,0E-05
areias médias	1,0E-04
areias grossas	1,0E-03

Fonte: Pinto (2006).

2.1.1 Fatores que influenciam a permeabilidade dos solos

Diversos fatores influenciam na permeabilidade dos solos, como por exemplo:

1. Forma e Textura dos grãos: partículas alongadas e irregulares criam caminhos mais tortuosos. Partículas com superfície de textura áspera desenvolvem maior

resistência ao atrito para o fluido. Ambos os efeitos tendem a reduzir a permeabilidade (Head e Epps, 2011).

2. Anisotropia: além da quantidade de vazios, a forma em que os mesmos estão dispostos é um fator altamente influente. Solos sedimentares são exemplos da influência da anisotropia na permeabilidade e, geralmente, esses apresentam coeficientes de permeabilidade na horizontal maiores que na vertical pois as partículas tendem a se depositar com suas maiores dimensões orientadas na horizontal (Das, 2007).

3. Grau de saturação: quando um solo não saturado é exposto a percolação, mesmo que por longo período, bolhas de ar permanecem contidas pela tensão superficial da água. Estas bolhas tendem a dificultar a percolação do fluido (Pinto, 2006).

4. Temperatura: com a variação da temperatura o peso específico do fluido muda, e também a viscosidade do mesmo, com isso há alteração do coeficiente de permeabilidade. Para tornar possível a comparação dos valores ensaiados, convencionou-se utilizar sempre o coeficiente referido a água na temperatura de 20 graus Celsius (Pinto, 2006).

5. Composição mineralógica: em solos de grãos finos, a composição mineralógica também é um fator que influencia na permeabilidade, pois diferentes tipos de minerais retêm diferentes espessuras de água adsorvida (Head e Epps, 2011).

Além destes, outros fatores que são objeto deste estudo serão apresentados em seções individuais na sequência deste trabalho.

2.1.2 Determinação do coeficiente de permeabilidade em laboratório

Segundo Head e Epps (2011), os ensaios de laboratório para determinação direta do coeficiente de permeabilidade são divididos em dois tipos:

1. Permeâmetro de carga constante: neste tipo de ensaio a água é abastecida constantemente, fazendo com que a diferença de carga seja a mesma durante todo o ensaio. Este ensaio é utilizado para solos com permeabilidade alta, como areias.

2. Permeâmetro de carga variável: utilizados para solos com permeabilidade baixa e média, como siltes e argilas, os quais não são viáveis para utilização da carga constante. Neste ensaio, é adicionado uma quantidade de água na entrada do permeâmetro e esta quantidade de água na entrada varia com o tempo do ensaio.

Quanto aos equipamentos para a determinação do coeficiente de permeabilidade Boynton e Daniel (1985), citam que existem basicamente dois tipos de permeâmetros: os permeâmetros de parede rígida e os permeâmetros de parede flexível. Na década de 1980 existiam debates sobre qual tipo de permeâmetro deveria ser usado para a mensuração da permeabilidade de argilas compactadas. Esses debates se baseavam em que o permeâmetro de parede rígida tem sua estrutura muito mais simples e de fácil moldagem, podendo o solo ser compactado no próprio permeâmetro. Existia, porém, a desconfiança de que poderiam ocorrer fugas de fluxo significativas nos contatos do solo com a parede rígida. No entanto no estudo de Boynton e Daniel (1985) foram comparados os tipos de permeâmetros com argilas de diferentes composições mineralógicas e umidades de compactação, e os resultados mostraram que não há diferença significativa entre as permeabilidades dos dois tipos de permeâmetros.

Os permeâmetros de parede rígida podem ser divididos em quatro tipos: célula de consolidação, tubo de amostragem, de maior escala e o molde de compactação (DANIEL, 1994).

Segundo Daniel (1994), pela sua praticidade, o permeâmetro do tipo molde de compactação é o mais utilizado em ensaios de permeabilidade. Esta praticidade estão ligadas as peças mais simples e a possibilidade de compactar o solo no próprio permeâmetro, assim reduzindo possíveis problemas na desmoldagem da compactação.

2.2 Compactação de solos

A compactação de solos é uma técnica baseada em reduzir o volume de vazios através de esforços mecânicos, expulsando o ar do interior do mesmo, para assim melhorar suas propriedades físicas (DAS, 2007).

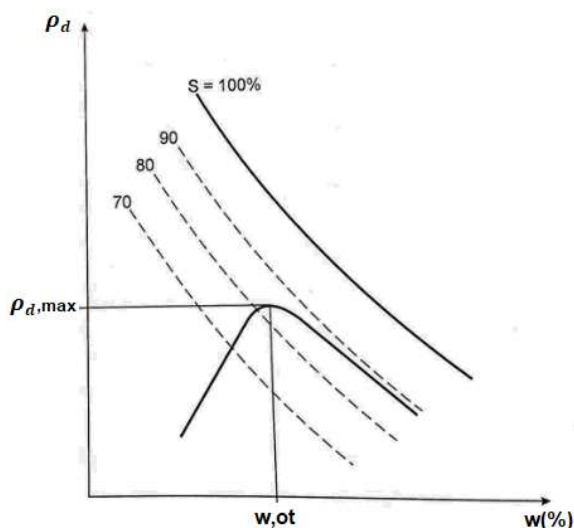
Esta técnica é muito utilizada quando se requer melhoras nas propriedades do solo como: aumento da resistência a compressão, aumento da resistência ao cisalhamento, redução de recalques e redução do coeficiente de permeabilidade.

A compactação de solos já era uma técnica utilizada nos tempos antigos, sendo utilizada para construção de barramentos e diques. Porém até o surgimento da alta demanda por estradas compactadas na década de 1920, este processo era feito de forma empírica, não sendo eficaz nem econômico. Então, a fim de se evitar problemas

na área de pavimentação, foi criada a demanda pelo desenvolvimento dos métodos de compactação mais eficazes. Os requisitos mais rigorosos de pistas de aeroportos e a necessidade de barragens de terra maiores se tornaram incentivos adicionais (TERZAGHI *et al.*, 1996).

O início da técnica de compactação que é utilizada nos dias de hoje se deu com Proctor na década de 30. Proctor concluiu em suas pesquisas que ao aplicar uma energia de compactação ao solo, a densidade seca do mesmo é função da sua umidade, e que há um teor de umidade, chamado teor ótimo, que leva à uma densidade seca máxima para cada intensidade de energia (PINTO, 2006). Na Figura 2 observa-se o comportamento típico da densidade seca em função do teor de umidade.

Figura 2 - Curva característica de compactação.



Fonte: adaptado de Massad (2003).

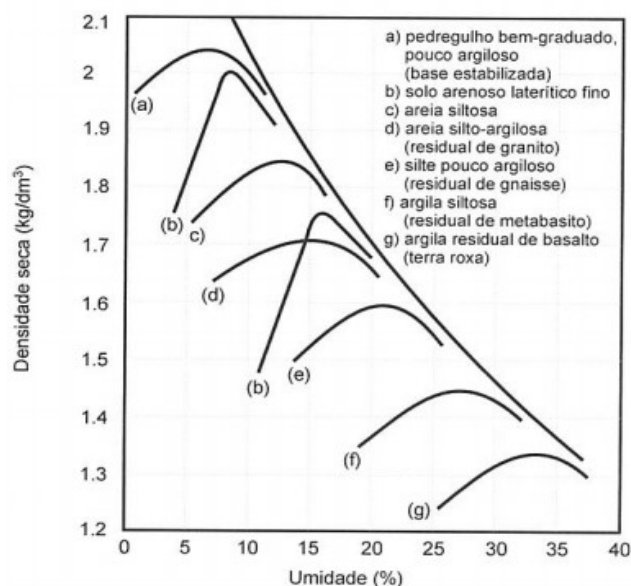
Como pode-se observar para um teor abaixo da umidade ótima, chamado ramo seco da curva de compactação, o atrito entre as partículas e a tensão capilar gerada pela pouca quantidade de água, dificultam uma melhor compactação do solo. Com o aumento da umidade, gera-se gradualmente a quebra na tensão superficial entre as partículas, facilitando a acomodação das partículas e reduzindo o índice de vazios. Porém com umidades acima da ótima (ramo úmido), a maior parte dos vazios é ocupado pela água e o ar que resta está ocluído por água, então quanto mais água adiciona-se mais difícil fica a aproximação das partículas sólidas, diminuindo a densidade seca atingível (PINTO, 2006; DAS, 2007).

2.2.1 Fatores que influenciam na compactação

2.2.1.1 Tipo de solo

Em função de sua granulometria, forma dos sólidos, peso específico dos sólidos, cada solo apresenta um comportamento diferente à compactação (DAS, 2007). Na Figura 3 estão apresentados valores típicos da densidade seca (ρ_d) e teor de umidade ótimo em função do tipo de solo.

Figura 3 - Curvas típicas de solos brasileiros.



Fonte: Pinto (2006).

2.2.1.2 Energia de compactação

O teor de umidade ótimo e a densidade seca máxima não são propriedades do solo. Por exemplo se um mesmo solo for submetido a um ensaio de compactação pela segunda vez mantendo-se todas as características do primeiro ensaio, porém com redução do peso do compactador, os resultados obtidos serão um menor valor de densidade seca máxima e um teor de umidade ótima maior (TERZAGHI *et al.*, 1996).

Este comportamento ocorre, pois, a energia de compactação no ensaio com o compactador mais leve, é menor. Os ensaios de compactação mais comumente utilizados são os ensaios dinâmicos de Proctor, que tem suas energias padronizadas

de acordo com os equipamentos disponíveis para a compactação em campo. A Tabela 2 apresenta as energias padronizadas pela NBR 7182/16.

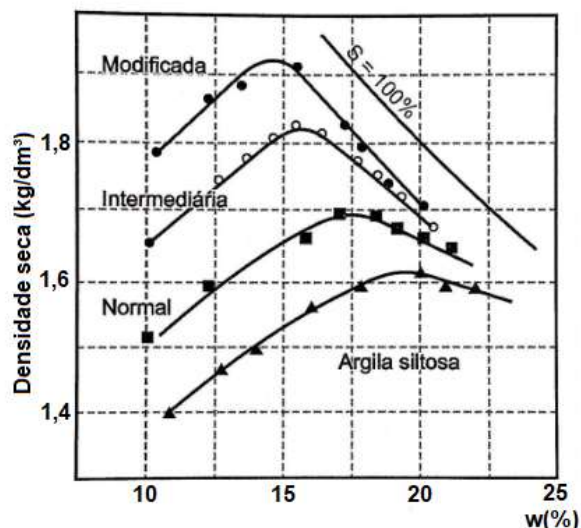
Tabela 2 - Energias de compactação padronizadas.

Designação	Peso (kg)	Altura de queda (cm)	N° de camadas	N° de golpes	Vol. do cilindro (cm ³)	Energia (kg*cm/cm ³)
Proctor Normal	2,5	30,5	3	26	1000	5,9
Proctor Normal	4,5	45,7	5	12	2000	6,2
Proctor Intermediário	4,5	45,7	5	26	2000	13,4
Proctor Modificado	4,5	45,7	5	55	2000	28,3

Fonte: adaptada de Massad, 2003.

Quanto maior energia aplicada maior a densidade seca máxima, porém após o ponto de umidade ótima esta diferença fica menos significativa. Este comportamento é justificado pela ocupação dos vazios pela água, que é um líquido quase incompressível. Com o aumento ainda da energia, pela quantidade de golpes, o solo apresenta um comportamento que é chamado usualmente por engenheiros de solos, borrachudo, onde o solo comprime as bolhas de ar oclusas no momento da compactação e expande após ser retirado o equipamento (PINTO, 2006). Na Figura 4 são apresentadas três curvas de compactação em diferentes energias, onde é possível notar o comportamento descrito pelo autor.

Figura 4 - Curva de compactação em função da energia aplicada.



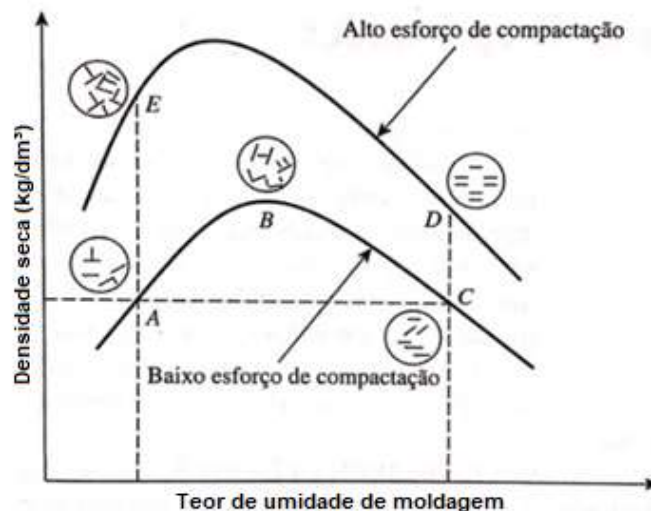
Fonte: Massad, 2003.

2.2.2 Efeito da compactação na permeabilidade

Segundo Terzaghi *et al.* (1996), o teor de umidade em que é feita a compactação de um solo, influencia em diversas propriedades físicas do solo, inclusive a condutividade hidráulica. Ensaio indicam que quando um solo é compactado com uma variação de umidade levemente abaixo da umidade ótima, ele pode apresentar um coeficiente de permeabilidade muito maior que se o mesmo material for compactado com essa mesma grandeza de variação, porem acima do teor ótimo.

Quando um solo argiloso é compactado com teor de umidade no ramo seco, a estrutura do solo se dará de forma floculada, como mostra o ponto A da Figura 5. Esta estrutura aparece, pois, com o solo seco a repulsão entre as partículas é baixa, e então se cria esta orientação aleatória, que gera maiores vazios e consequentemente maior permeabilidade. Já quando o teor de umidade aumenta, a repulsão entre as partículas de argila aumenta, e a aplicação da energia de compactação orienta-as paralelamente gerando a estrutura chamada dispersa, esta estrutura dificulta a percolação resultando em coeficientes de permeabilidade menores (LAMBE e WHITMAN, 1969).

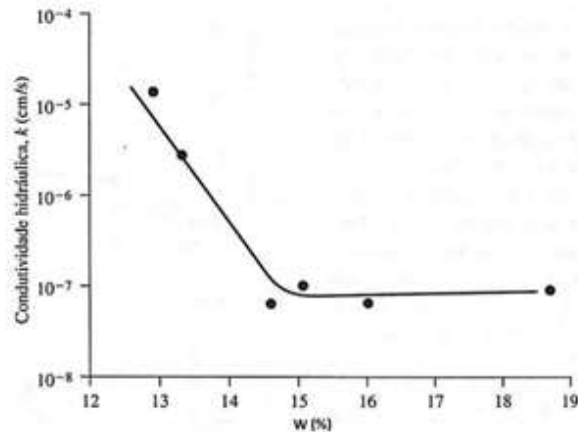
Figura 5 - Estrutura de um solo compactado.



Fonte: adaptado de LAMBE, 1958 apud DAS, 2007.

A Figura 6 mostra o comportamento do coeficiente de permeabilidade ao longo da curva de compactação de uma argila arenosa da Jamaica, nela é possível notar o comportamento da estrutura compactada como descrito anteriormente.

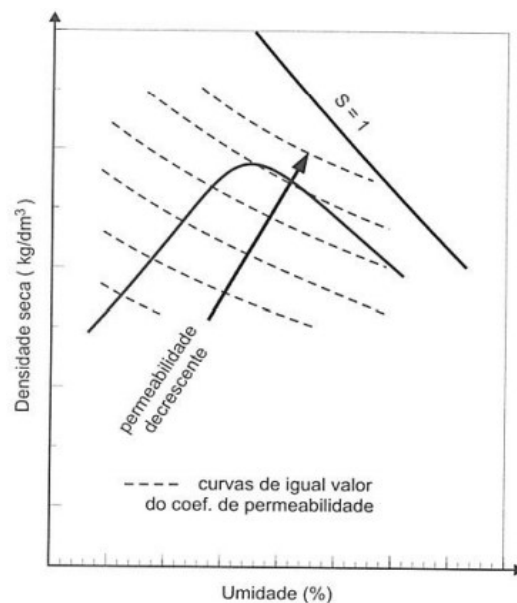
Figura 6 - Comportamento do coeficiente de permeabilidade em função da umidade.



Fonte: LAMBE 1958 apud DAS, 2007.

Pinto (2006) apresentou a tendência típica de curvas de mesmo coeficiente de permeabilidade, em função do teor de umidade de compactação e da densidade seca, geradas por interpolação de resultados de diversos ensaios realizados em solos brasileiros, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Tendência de variação do coeficiente de permeabilidade com a umidade e a densidade de compactação.



Fonte: Pinto, 2006.

A partir destes dados consegue-se perceber, que para uma mesma umidade, a permeabilidade é menor conforme a diminuição da densidade seca, o que se deve ao fato de o único fator variável ser o índice de vazios. Também foi possível perceber que para uma mesma densidade seca a permeabilidade diminui com o aumento do teor de umidade, o que pode ser atribuído a diferença de estrutura no ramo seco para o ramo úmido da curva de compactação conforme a Figura 5 (PINTO, 2006).

2.2.3 Formas de compactação

De acordo com Rico e Del Castilho (2005) a compactação em campo é um processo lento e custoso, por isso cria-se a necessidade de utilizar técnicas de laboratório cada vez mais fáceis, econômicas e que descreva o comportamento em campo. Segundo os autores as diversas técnicas podem se agrupar em quatro grupos: compactação dinâmica, compactação estática, compactação por amassamento e compactação por vibração.

2.2.3.1 Compactação dinâmica

A compactação dinâmica, é um dos métodos mais utilizado para construção de obras de infraestrutura geotécnica. O método envolve a aplicação de cargas de impacto repetidas, permitindo a compactação de camadas relativamente mais espessas que método estático (PORAN e RODRIGUEZ, 1992). O ensaio mais comum de compactação dinâmica é o ensaio de Proctor da NBR7182/16, descrito na seção 2.2.1.

Além das energias padronizadas mostradas na Tabela 2, o método permite variar a energia de acordo com a necessidade, a partir da Equação 2:

$$EC = \frac{M * H * Ng * Nc}{V} \quad (2)$$

Onde:

EC – Energia de compactação (N/cm²);

M – Peso do soquete (N);

H – Altura de queda do Soquete (cm);

N_g – Número de golpes por camada;

N_c – Número de camadas;

V – Volume de solo compactado (cm^3).

2.2.3.2 Compactação estática

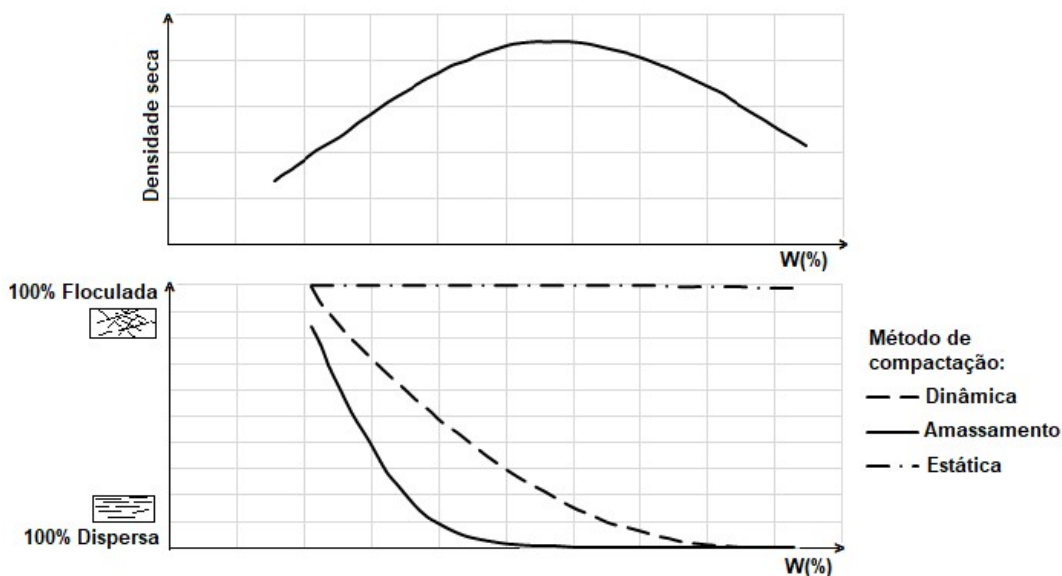
Este método consiste basicamente na aplicação de uma força estática uniforme, gradualmente aplicada, que normalmente é gerada por uma prensa hidráulica. Segundo Reddy e Jagadish (1993), há dois tipos de compactação estática, que são:

1. Compactação estática de pressão variável com tensão máxima, onde a força é aplicada ao cilindro com taxa de variação definida, até uma energia pré-determinada ser alcançada, neste método o volume compactado depende da umidade, então pode-se gerar curvas de compactação parecidas com a de Proctor;

2. Compactação estática de pressão constante com volume máximo, é o método onde a força é aplicada gradualmente no solo até o corpo de prova chegar à um volume final pré-definido. Neste procedimento o volume final e a energia aplicada dependem da quantidade de solo que é adicionada ao molde.

Segundo Pozzebon (2017), todos os métodos de compactação levam a uma estrutura floclada se o solo for compactado abaixo do teor ótimo. Já quando compactado acima do teor ótimo o comportamento da estrutura do solo depende da intensidade da aplicação de distorções (deformações cisalhantes), quanto maior a intensidade mais dispersa se dará a estrutura. Seed e Chan (1959, apud WERK, 2000), nos seus estudos sobre a influência do método de compactação nas propriedades do solo, notaram que com a umidade acima do teor ótimo o método estático, que gera pouca ou nenhuma distorção, forma uma estrutura floclada, assim como a formada na umidade abaixo da ótima. O comportamento descrito pelos autores acima pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Influência do método de compactação na estrutura do solo.



Fonte: adaptado de Neves, 1971.

A diferença de estrutura entre a compactação estática e dinâmica citada pelos autores, pode levar a significativas diferenças na permeabilidade do solo que será estudado neste trabalho.

2.3 Interação química solo-água

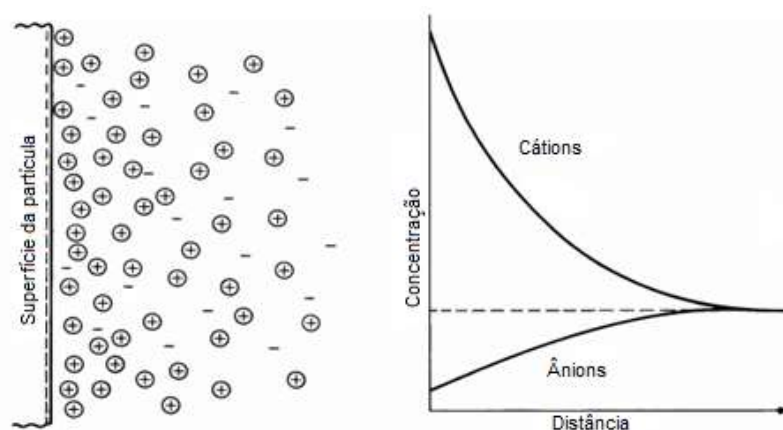
A maioria dos solos finos se encontram com índices de vazios maiores que 1, o que significa que se o solo está saturado, há maior volume de água do que de sólidos, porém a maior parte dos estudos do solo se concentram na composição mineralógica e estrutura dos sólidos, e não fase líquida. O conhecimento da fase líquida se faz necessário, pois nem a superfície dos sólidos, nem a água, são quimicamente inertes, o que gera interações químicas entre as duas fases (MITCHELL E SOGA, 2005).

A compatibilidade química solo-líquido em relação a permeabilidade é de grande importância. Segundo Shackelford (1994), problemas de compatibilidade podem levar a significativas variações da condutividade hidráulica, resultado da floculação de partículas de argila pela interação com soluções eletrolíticas, encolhimento (retração) do solo com a interação com solventes orgânicos concentrados, e a dissolução do solo através de ácidos ou bases.

2.3.1 Química das argilas

O estudo da química das argilas lida com as interações no sistema eletrolítico que é criado na interação argila-água, pois as superfícies das partículas de argilas geralmente carregam uma carga líquida negativa, atraindo os cátions do líquido para a sua superfície, criando uma dupla camada difusa. A dupla camada é composta de uma camada interna onde os íons se encontram adsorvidos na superfície da partícula, e uma outra camada difusa com os íons dispersos na água, de acordo com a influência das forças elétricas gerada pelo sistema (RAHMAN, 2000). Na Figura 9 pode-se observar o comportamento dos íons na dupla camada.

Figura 9 - Dupla camada difusa.



Fonte: adaptado de Mitchell e Soga, 2005.

Como se pode ver na Figura 9, a superfície da partícula é neutralizada pelos íons do líquido e na outra extremidade os cátions e ânions são balanceados dentro do volume do líquido. Assim quando duas partículas de argilas estão próximas as duplas camadas de cada interagem para manter uma distância entre elas. Esta interação pode sofrer alterações levando a uma expansão ou contração da dupla camada, causando a floculação ou dispersão das partículas (RAHMAN, 2000).

2.3.2 Potencial hidrogeniônico

Ácidos são substâncias que reagem em solução aquosa, liberando íons de hidrogênio, sendo o hidrogênio um elemento com apenas um elétron, o íon (H^+) é somente um próton, então, comumente os ácidos são conhecidos como doadores de

próton. Já as bases são as substâncias receptoras de prótons, que reagem com os ácidos recebendo o íon H^+ e produzem íons hidróxidos (OH^-) (BROWN *et al.*, 2016)

O pH, potencial hidrogeniônico, é a escala logarítmica criada para facilitar a quantificação da concentração de ácidos e bases, a escala surgiu basicamente pela dificuldade de quantificar os íons hidrônios (H_3O^+), formado pelo íon H^+ em água, pois estes variam muito sua ordem de grandeza. Sendo matematicamente o cologarítmo na base 10 da concentração de H_3O^+ em mols por litro, ou seja, quanto maior a concentração menor o pH e mais ácida é a solução. Sendo neutro o pH da água pura destilada igual a 7 (ATIKINS e JONES, 2012).

Os ensaios de permeabilidade são comumente realizados com água destilada, porém em campo as águas de barragens, por exemplo, apresentam diversas variações nas propriedades químicas. Na Tabela 3 pode-se verificar a variação do pH entre barragens e até mesmo numa única ao longo do período do ano.

Tabela 3 - Valores de pH encontrados em barragens brasileiras.

Barragem	Localização	pH	Fonte
Barragem de Santa Cruz	RN	8,4	Melo et al. 2016
Barragem de Gurjaú	PE	6,6	Santos et al. 2016
Barragem de Pirapama	PE	6,4	Santos et al. 2016
Barragem de Solidão	PE	5,2	Santos et al. 2016
Barragem de Santa Cruz de Malta	PE	7,3	Santos et al. 2016
Barragem do Poxim	SE	6,9 a 7,8*	Neves et al. 2015

* O pH da água desta barragem foi medido ao longo do ano

Fonte: elaboração própria.

Os pHs das águas de barragens naturalmente já não são neutros, como mostra a Tabela 3, pois a mesma entra em contato com diversos fatores contaminantes. Além disso, grande parte das barragens ficam localizadas em áreas agrícolas, onde podem ser expostas ao contato de produtos fitossanitários e fertilizantes químicos, que em contato com a água alteram suas propriedades químicas.

Na Tabela 4 são apresentados valores do pH em água de diversos tipos de fertilizantes encontrados no comércio.

Tabela 4 - PH de fertilizantes em água.

Fertilizante e/ou corretivo de acidez	pH
Sulfato de amônio	4,2
Nitrato de amônio	5,4
Nitrato de cálcio	6,5
Ureia	7,6
Nitrato de potássio	6,5
Sulfonitrato de amônio	4,0
Salitre do Chile (nitrato de sódio)	9,6
Fosfato bicálcio	7,0
Superfosfato simples	3,0
Superfosfato triplo	3,1
Fosfato parcialmente aciludado	3,9
Fosfato de ureia	2,7
Fosfato monopotássico (MKP)	4,5
Ácido fosfórico (54% P ₂ O ₅)	2,6
Termofosfato	9,3
Escória siderurgica	12,7
DAP (fosfato diamônico)	7,5
MAP (fosfato monoamônico)	3,7
KCl	5,8
K ₂ SO ₄	5,7
Sulfato de potássio e magnésio (K-Mag)	5,3
FeCl ₃	1,2
ZnO	8,2
Gesso agrícola	5,9
Cal hidratada	11,0
Calcário calcítico	9,4
Calcário dolomítico	9,9
Calcário magnesiano	10,0
Calcário calcinado	12,8

Obs: 1g de fertilizante para 10 mL de água destilada (pH=6,34)

Fonte: adaptado de Trani e Trani, 2011.

2.3.3 Influência do pH na permeabilidade

Segundo Mitchell e Soga (2005), nas superfícies e bordas das partículas de argila há hidróxidos (OH^-) expostos. A tendência destes hidróxidos se dissociarem liberando H^+ em água é intensificada quanto mais alto é o pH, ou seja, quanto mais alcalina a solução. Com o íon H^+ entrando em solução a carga negativa na superfície da argila é aumentada, levando a um aumento na dupla camada difusa dispersando

as partículas. Já um baixo pH ioniza positivamente e interage com a superfície eletronegativa reduzindo a dupla camada difusa e aproximando as partículas, o que gera a flocculação destas.

Este comportamento apresentado com a variação do pH da solução pode levar a variações na permeabilidade. Segundo Rahman (2000), a flocculação cria um efeito de erosão das partículas que são pequenas, criando espaços vazios e aumentando a permeabilidade. E da mesma forma a dispersão das partículas, gerada pela expansão da dupla camada, reduz o espaço livre, diminuindo a permeabilidade.

Um exemplo do aumento da permeabilidade devido à adição de uma solução ácida é um estudo de Gipson (1985), onde através da percolação de uma solução ácida de pH=2,2 em misturas de areia siltosa com 7,5, 10 e 15% de bentonita, obtiveram-se, respectivamente, permeabilidades 7, 13, e 41 vezes superiores. Ou seja, quanto maior a porcentagem da argila mais significativa a diferença na permeabilidade.

2.4 Barragens de terra

A disponibilidade e qualidade adequada de água é essencial para o desenvolvimento socioeconômico da humanidade. Uma barragem se bem planejada e construída pode contribuir muito em diversos fatores. Alguns exemplos de áreas de aplicação são: abastecimento público, setor energético, agricultura, controle de cheias, transporte e recreação (ICOLD,2008).

As barragens de terra são basicamente estruturas de solo compactado construídas para reter e desviar o caminho natural da água, que vem sendo utilizadas desde os tempos mais remotos da humanidade. A barragem de terra é o tipo de barragem mais comum encontrada em todo o mundo (FAO, 2011). Segundo a ICOLD (2008), dados mundiais do ano 2000 indicam que em torno de 50 mil grandes barragens se encontram em funcionamento e estima-se que as barragens de aterro representem 75% das barragens existentes no mundo.

Segundo a FAO (2011), os ganhos financeiros advindos da agricultura raramente justificam a construção de barragens mais robustas e tecnologicamente avançadas, visto isso, a alternativa mais utilizada comumente são as barragens de terra. Ainda segundo a FAO 2011, barragens de aterro de pequeno porte são uma alternativa muito apropriada para exploração agrícola, quando corretamente

projetadas, e utilizando materiais adequados, podem ser construídas com equipamentos pouco sofisticados, e também necessitam de pouca manutenção.

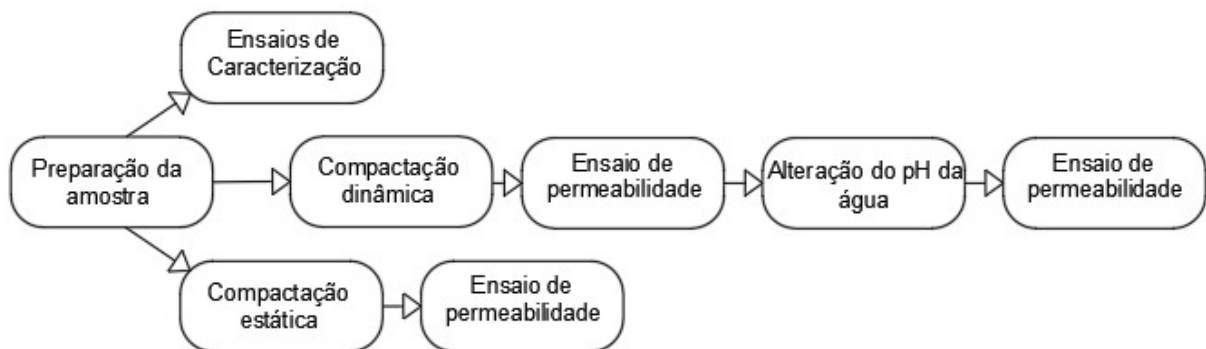
Segundo Terzaghi *et al.* (1996), as barragens de terra devem ser adaptadas aos materiais disponíveis mais próximo ao local a serem construídas, e devem ser suficientemente impermeáveis para reter a água, suficientemente estável para suportar o carregamento que será submetida, e também capaz de resistir a erosão ou piping. Ainda segundo o autor, os diferentes materiais encontrados nos locais de construção, possuem propriedades que satisfazem essas condições em diferentes graus. Então estes materiais são selecionados e organizados de forma a atender todos os requisitos e tornar a barragem mais eficiente e econômica. Este arranjo de diferentes materiais é denominado Zoneamento.

Normalmente em barragens zoneadas o núcleo é utilizado como controle de vazão, e as abas para dar estabilidade a estrutura. Uma variação deste tipo de barragem, é o zoneamento utilizando um mesmo material em condições diferentes de umidade de compactação, otimizando o uso de um único material. Neste caso as abas são compactadas com o solo abaixo da umidade ótima para dar resistência, e o núcleo com solo mais úmido para dar estanqueidade (Massad, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste projeto foram realizados três tipos de ensaio, que são: caracterização, compactação e permeabilidade. Sendo que, os ensaios de compactação foram feitos de duas formas: dinâmica e estática. O ensaio compactação estática foi feito após a leitura de permeabilidade no de compactação dinâmica, pois, além de serem utilizados os dados da compactação dinâmica, pela limitação de equipamentos, foram utilizados alguns moldes do ensaio anterior. Já nos corpos de prova restantes, foram feitos os ensaios de permeabilidade com a água em diferentes níveis de pH. Na Figura 10 é esquematizada sequência de ensaios que foram utilizados na pesquisa.

Figura 10 – Fluxograma da sequência de ensaios.



Fonte: elaboração própria.

3.1 Materiais

Nesta seção estão descritas as características dos materiais utilizados para a realização da pesquisa.

3.1.1 Solo

O solo estudado é proveniente de uma jazida localizada no bairro Caverá, no interior do município de Alegrete-RS. Na Figura 11 é apresentada uma imagem de satélite georreferenciada da jazida, que está localizada nas coordenadas: 29°50'14" S, 55°46'27" W.

Figura 11 – Local da coleta do solo.



Fonte: Google Earth, em 14/06/2019.

3.1.2 Água e fertilizantes

Foi utilizada a água procedente do abastecimento urbano do município de Alegrete – RS, após ser passada pelo procedimento de destilação, tendo o $\text{pH} \approx 6,3$. Através das informações disponíveis na Tabela 4 e dos produtos encontrados na região foram feitas dosagens da porcentagem e tipo de fertilizante para tornar a água destilada em um meio básico e ácido. Com isto definiu-se que seriam utilizados como bases o calcário dolomítico, utilizado como corretivo de acidez do solo, e a ureia, utilizada como fonte de nitrogênio. Como ácido será utilizado o superfosfato triplo, que é usado como fonte de fósforo. Na Tabela 5 estão apresentadas as dosagens feitas, onde a partir da massa da água foram pesadas diferentes porcentagens de fertilizante, para obter-se a quantidade mínima de fertilizante que trouxesse uma alteração significativa no pH da água destilada.

Tabela 5 – Dosagem do pH da solução utilizada.

% de calcário	pH	% de superfosfato	pH	% de ureia	pH
0,5	9,7	0,5	3,4	0,5	7,0
1,0	9,7	1,0	3,4	1,0	7,4
1,5	9,7	1,5	3,4	1,5	7,6
2,0	9,7	2,0	3,4	2,0	8,2
-	-	-	-	2,5	8,3
-	-	-	-	3,0	8,3

Fonte: elaboração própria.

Como pode ser visto na Tabela 5, o calcário dolomítico e o superfosfato triplo, com apenas 0,5% de concentração, apresentaram a sua máxima variação no pH da água. Já a ureia, para se ter uma variação significativa, foi necessária uma concentração de 2%. Estas são as porcentagens de cada fertilizante que estão sendo utilizadas.

3.2 Métodos

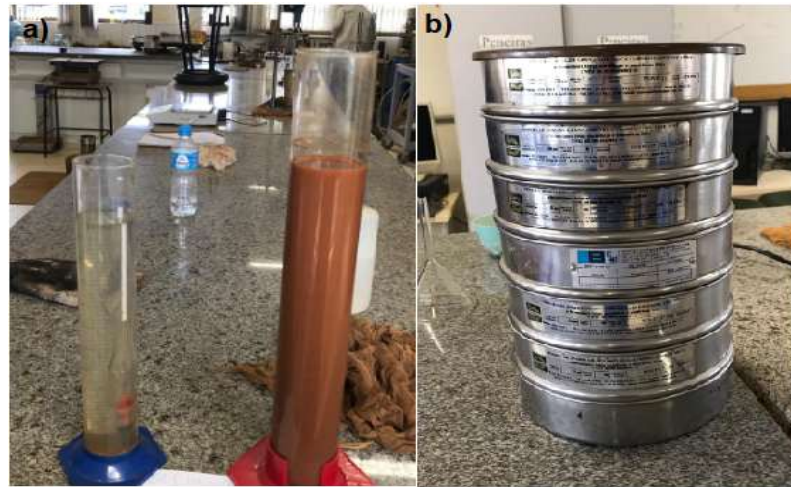
Nesta seção estão apresentados todos os procedimentos realizados, para a elaboração desta pesquisa.

3.2.1 Caracterização do solo

O solo que foi utilizado na pesquisa já foi previamente armazenado na Unipampa Alegrete, de onde foi retirada a quantidade necessária de amostra do solo para a caracterização do material de acordo com a NBR6457/16, este material recolhido foi seco ao ar, quarteado e destorroado previamente aos ensaios.

O primeiro ensaio a ser feito foi o ensaio de análise granulométrica, de acordo com a NBR 7181/16, esta norma prevê o método de análise por uma combinação de peneiramento e sedimentação. O processo de sedimentação e peneiramento estão apresentados nas Figura 12 a e b, respectivamente.

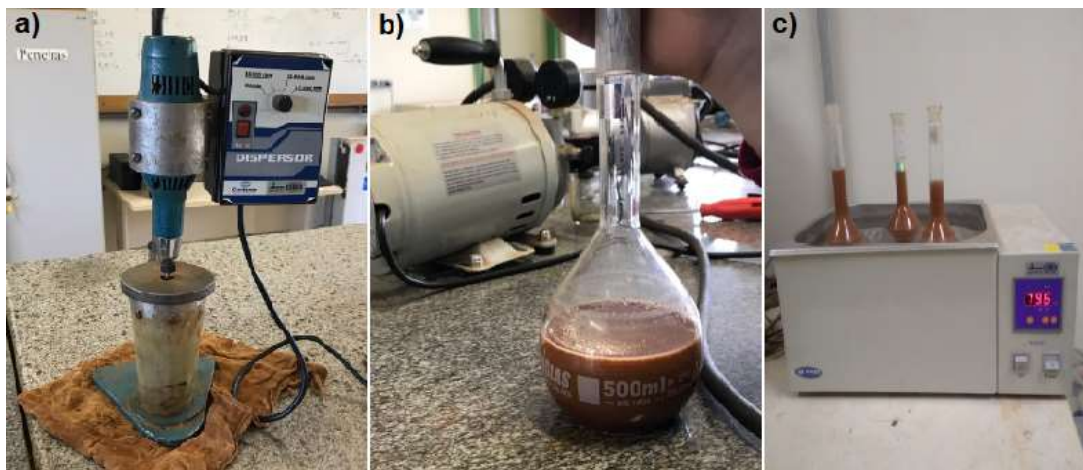
Figura 12 - Ensaio de análise granulométrica.



Fonte: elaboração própria.

O ensaio para a determinação da massa específica dos grãos foi realizado de acordo com a NBR 6508/84, pela qual é utilizado solo passante na peneira de 4,8mm. Na Figura 13 a, b e c, são mostrados os procedimentos do ensaio.

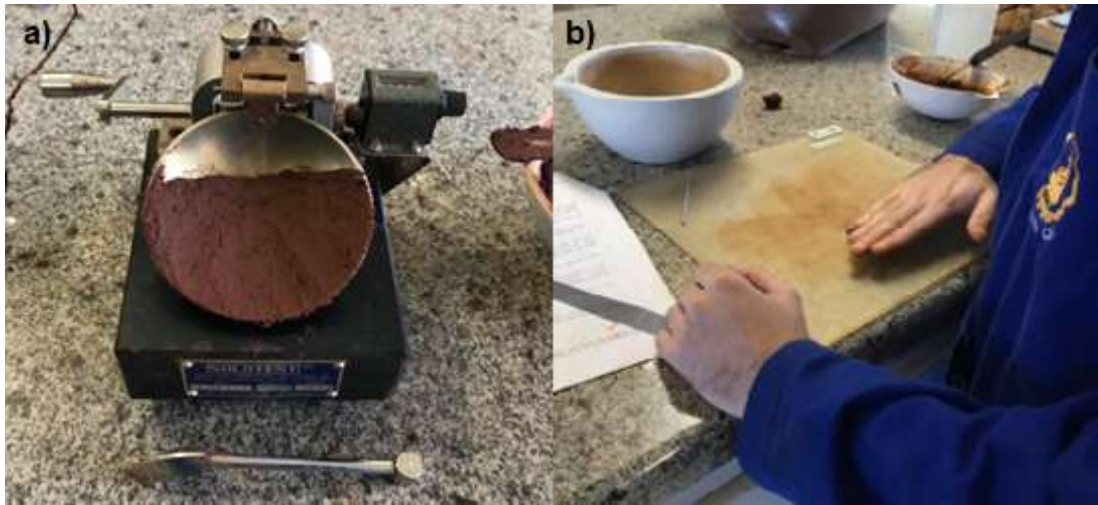
Figura 13: Ensaio de massa específica.



Fonte: elaboração própria.

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade são feitos de acordo com as normas, NBR 6459/16 e NBR7180/16 respectivamente. Na Figura 14a é mostrada a realização do ensaio de limite de liquidez e na Figura 14b a realização do limite de plasticidade.

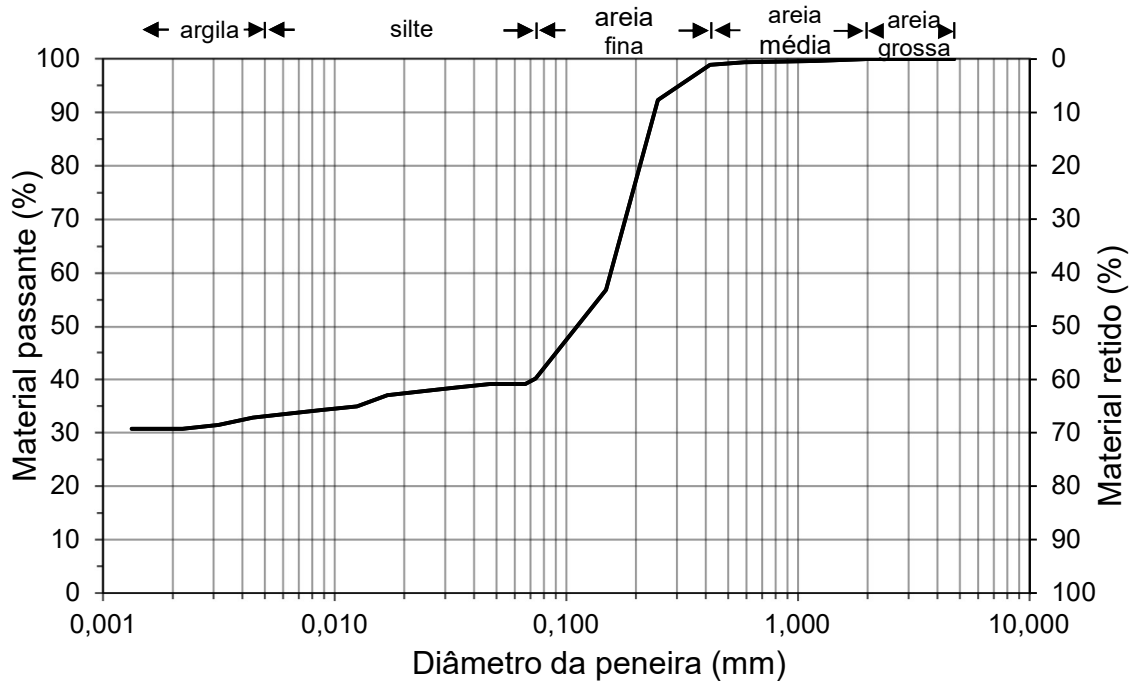
Figura 14: Ensaios de Limite de Liquidez e Plasticidade



Fonte: elaboração própria.

A partir dos resultados dos ensaios de análise granulométrica, e a massa específica dos grãos encontrada de $2,63 \text{ g/cm}^3$, foi gerada a curva granulométrica do material, mostrada na Figura 15. E Na Tabela 6 é mostrada a porcentagem de cada material que compõe o solo.

Figura 15 - Curva granulométrica.



Fonte: elaboração própria.

Tabela 6 - Porcentagem de materiais.

Areia grossa (4,8 - 2,0mm)	Areia média (2,0 - 0,42mm)	Areia fina (0,42- 0,075 mm)	Silte (0,075 - 0,005 mm)	Argila (<0,005mm)
0,00%	1,10%	58,80%	7,10%	33,00%

Fonte: elaboração própria.

Na Tabela 7 são mostrados os limites de Atterberg, índice de atividade coloidal e o índice de grupo do solo. Com estes resultados foi possível classificar o solo como SC pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS, e A-4, com índice de grupo igual 8, pela classificação Transportation Research Board - TRB. Em relação ao índice de plasticidade o solo fica classificado com média plasticidade. E através do índice de atividade é possível classificar a argila presente no solo como inativa.

Tabela 7 - Limites de Atterberg e Índices.

Limite de Liquidez (LL)	16%
Limite de Plasticidade (LP)	25%
Índice de Plasticidade (IP)	9%
Índice de Atividade Coloidal (IA)	0,29

Fonte: elaboração própria.

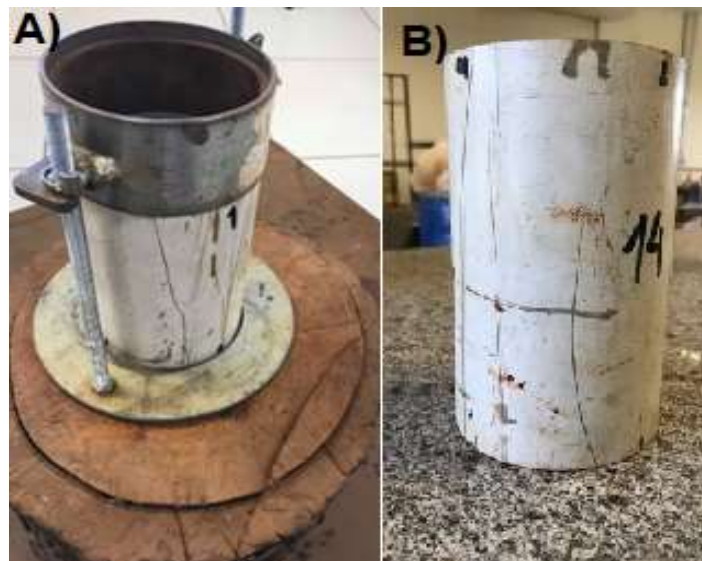
3.2.2 Ensaio de compactação dinâmica

Primeiramente a preparação da amostra para compactação foi feita de acordo com a NBR 6457/2016, esta norma prevê três possíveis processos para a preparação do material, neste trabalho foi utilizado o processo com a secagem prévia da amostra até a umidade higroscópica. Também na norma NBR 6457/16 foi determinado, como todo o solo é passante na peneira com abertura de 4,8mm, que deveria ser utilizado o molde de compactação pequeno e a quantidade necessária de solo para cada corpo de prova.

Neste trabalho o corpo de prova da compactação foi utilizado para o ensaio de permeabilidade, então o processo de compactação dinâmica foi feito de maneira adaptada da NBR 7182/16, utilizando a energia normal. A adaptação consiste na

mudança do molde de compactação, do cilindro metálico normatizado para um tubo de PVC de parede rígida, e espessa o suficiente para não se deformar no processo. Além disto será utilizado um disco espaçador no fundo do molde para posterior moldagem do permeâmetro. Na Figura 16A é possível visualizar o molde de compactação montado e na Figura 16B pode-se ver um exemplo do tubo de PVC que foi utilizado.

Figura 16 - Molde de compactação.



Fonte: elaboração própria.

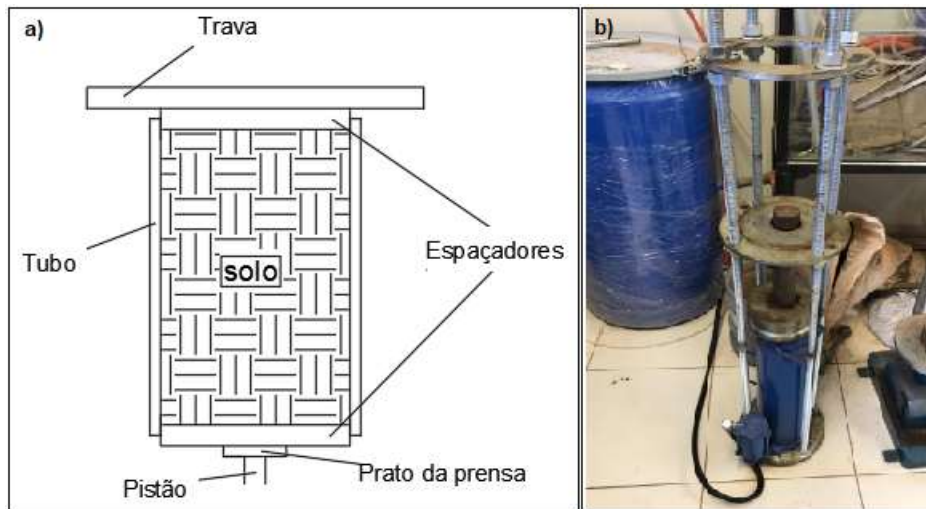
3.2.3 Ensaio de compactação estática

O ensaio de compactação estática foi feito através de uma prensa hidráulica, com base nos resultados da compactação dinâmica, com as quais foi pré-determinada a umidade e quantidade necessária de solo para um volume definido do mesmo, para quando compactado estaticamente, ficar com a mesma densidade do ponto da curva de compactação dinâmica. Os passos para o ensaio são:

1. Determinação do ponto de umidade e quantidade de solo em gramas, necessária para a compactação;
2. Ajuste da umidade do solo, através da homogeneização da amostra;
3. Compactação da amostra na prensa hidráulica mostrada na Figura 17b. O molde de compactação foi o mesmo tubo de PVC utilizado no ensaio dinâmico, porém, neste ensaio, foram utilizados dois discos espaçadores de acordo com o esquema mostrado na Figura 17a.

Na Figura 18 é mostrado como foi montado o equipamento da compactação, onde foi verificada a necessidade de utilizar outros dois moldes de PVC, um em cada lado da amostra para possibilitar colocar-se a quantidade necessária de solo, e também para centralizar o solo, visando uma melhor uniformidade no índice de vazios após a compactação.

Figura 17 - Equipamento para compactação estática.



Fonte: elaboração própria.

Figura 18: Compactação estática.



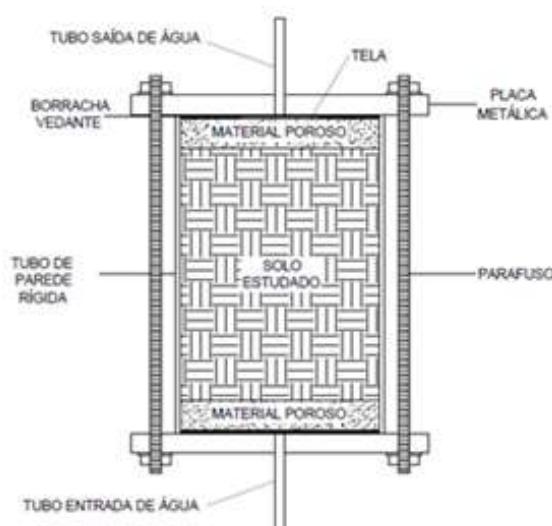
Fonte: elaboração própria.

3.2.4 Ensaio de permeabilidade

Como o interesse do estudo visa como um dos objetivos a avaliação da influência da compactação na permeabilidade, o permeâmetro que será utilizado é o permeâmetro de parede rígida do tipo molde de compactação. Como foi dito na seção 2.1.2, este tipo de permeâmetro utiliza diretamente o corpo de prova da compactação sem a necessidade de desmoldagem.

A célula de ensaio utilizada é uma adaptação do modelo proposto por Daniel (1994), sendo composta por: Duas placas metálicas, um tubo de PVC com parede rígida, material poroso, parafusos, borrachas de vedação, e tubos para entrada e saída de água. Como material poroso está sendo utilizada uma camada de areia grossa e média solta na entrada e saída da célula. Além disto estão sendo utilizadas telas metálicas com orifícios de diâmetros levemente menores que o diâmetro mínimo da areia utilizada, pois como a areia está sendo aplicada de forma solta, observou-se a necessidade de utilizar um sistema de retenção para evitar a perda do material pelos tubos de entrada e saída. Na Figura 19 é mostrada a forma final da célula utilizada e seus componentes.

Figura 19 – Célula de permeabilidade.

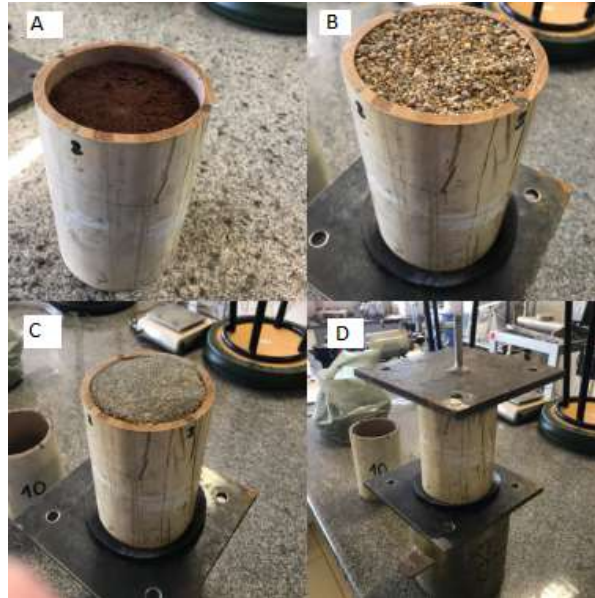


Fonte: Adaptado de Daniel, 1994.

Na Figura 20 é apresentada a sequência de execução da célula do permeâmetro. Após terminado o processo de montagem é fixada a mangueira no tubo de entrada, e posicionado o conjunto em ambiente de temperatura controlada.

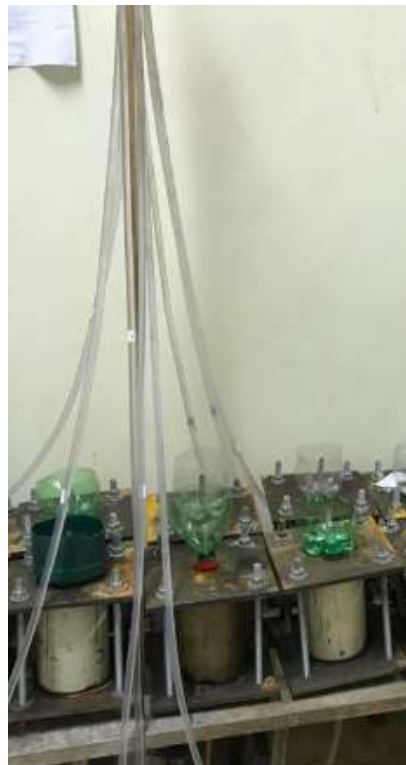
Na Figura 21 são mostrados os permeômetros os permeômetros moldados.

Figura 20 – Sequência de montagem da célula do permeômetro.



Fonte: elaboração própria.

Figura 21 – Permeômetros montados.



Fonte: elaboração própria.

As leituras da permeabilidade após a compactação dinâmica e estática começaram após aproximadamente 2 meses, quando se notou a saturação completa de todos corpos de prova, pelo fluxo constante na saída do permeâmetro. Já o ensaio de permeabilidade com a água em diferentes níveis de pH, o processo de saturação está descrito na seção 3.2.5.

Pelas características do solo neste estudo está sendo utilizado o ensaio de carga variável. Para este ensaio o cálculo do coeficiente de permeabilidade é dado através da Lei de Darcy, que aplicada a este tipo de permeâmetro chega-se no formato mostrado na Equação 3.

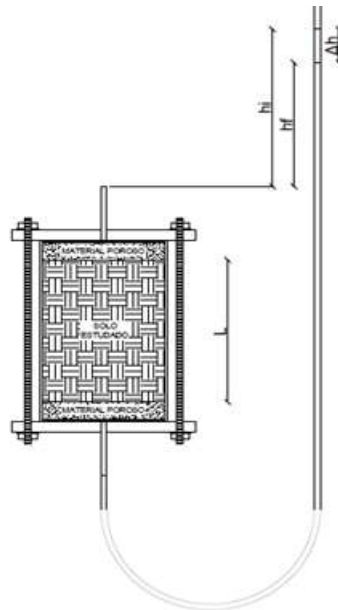
$$k = 2,3 \frac{aL}{At} \log \frac{h_i}{h_f} \quad (3)$$

Onde:

- k - Coeficiente de permeabilidade (cm/s);
- a - área da seção da mangueira (cm²);
- L - Comprimento da amostra (cm);
- A - Área do permeâmetro (cm);
- t - Diferença de tempo entre as leituras (s);
- h_i - Carga de água inicial (cm);
- h_f - Carga de água final (cm).

Na Figura 22 é esquematizada, a montagem do permeâmetro e as variáveis da equação.

Figura 22 – Permeâmetro utilizado.



Fonte: elaboração própria.

Após o cálculo do coeficiente de permeabilidade, conforme a seção 2.1.1, Pinto (2006) cita que é necessária a correção do mesmo de acordo com a temperatura do ambiente em que o permeâmetro está localizado. A correção é feita através da Eq. (4), que relaciona a massa específica do líquido na temperatura ambiente com a mesma a 20°C. Os corpos de prova estudados foram armazenados em sala com temperatura ambiente de 18°C.

$$k_{20} = k \frac{\mu}{\mu_{20}} \quad (4)$$

Onde:

k_{20} - Coeficiente de permeabilidade a 20°C (cm/s);

k - Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

μ_{20} - Densidade da água a 20°C;

μ - Densidade na temperatura ambiente.

3.2.5 Ensaio de permeabilidade em diferentes níveis de pH

Para a percolação da água com pH diferente foram utilizados 8 corpos de prova ao longo da curva de compactação dinâmica. Sendo 4 no ramo seco, um na umidade ótima e 3 no ramo úmido.

Considerando a maior dificuldade de neutralizar uma solução ácida do que uma básica, primeiramente foi utilizado o calcário, e posteriormente foram utilizados, a ureia e o superfosfato triplo. A permeabilidade foi medida a partir do momento que o pH medido na saída do permeâmetro for o mesmo da entrada. O cálculo do coeficiente de permeabilidade foi feito utilizando a Equação 3.

A medição do pH está sendo feita com o pHmetro Tekna, modelo T-1000, mostrado na Figura 23, calibrado a cada utilização, com duas soluções tampão.

Figura 23 - PHmetro utilizado.



Fonte: elaboração própria.

3.2.6 Simulação de barragens

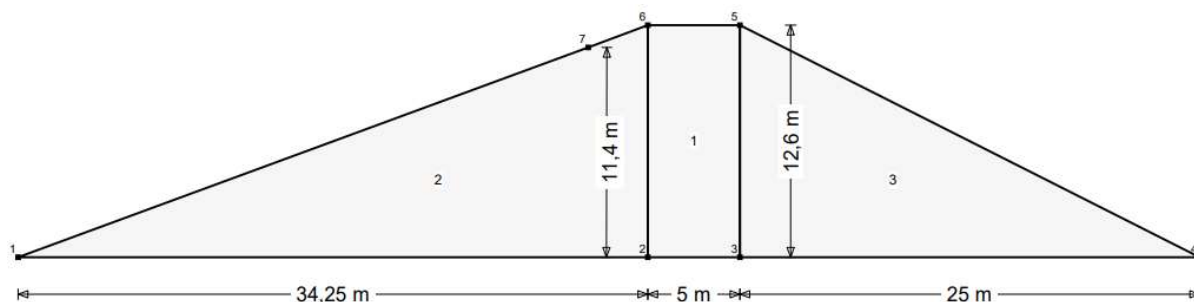
Com os resultados dos ensaios de permeabilidade, foram feitas 4 simulações para verificar-se a influência entre as diferentes umidades de compactação na vazão de barragens. As simulações foram realizadas no software Seep/w Geostudio 2018.

Para isto foram utilizados os dados dimensionais de uma barragem construída no município de Quaraí-RS, que teve seu dimensionamento e execução acompanhados por Abreu (2015). O modelo simulado está apresentado na Figura 24. Foram realizadas 4 configurações de barragens, que são:

1. Barragem homogênea, com solo compactado na umidade ótima;
2. Barragem homogênea, com solo compactado em umidade de 1,5% acima da ótima;

3. Barragem zoneada, com região 1 utilizando solo compactado na umidade ótima, e regiões 2 e 3 utilizando solo compactado com umidade de 1,5% abaixo da umidade ótima;
4. Barragem zoneada, com região 1 utilizando solo compactado com umidade de 1,5% acima da umidade ótima, e regiões 2 e 3 utilizando solo compactado com umidade de 1,5% abaixo da umidade ótima;

Figura 24 - Modelo simulado.



Fonte: Adaptado de Abreu, 2015.

Como pode ser visto na Figura 24, a barragem está dividida em três regiões, sendo a região 1 o núcleo, região 2 talude à montante, e região 3 talude a jusante.

As seguintes configurações, e dados foram utilizados no software:

1. Tipo de Regime: permanente;
2. Nível da água: 11,4m;
3. Teor Saturado: variando com o ponto da curva de compactação;
4. Kx saturado: variando com a umidade de compactação;
5. Teor de umidade residual: 3,5%.

Na Tabela 8 estão apresentados os dados de entrada no software, de cada situação de umidade de compactação.

Tabela 8 - Dados de entrada no Geostudio.

Umidade de compactação	Kx Saturado (m/s)	Teor saturado
Umidade ótima	6,71E-09	0,176
1,5% acima da ótima	1,97E-08	0,184
1,5% abaixo da ótima	2,36E-06	0,18

Fonte: elaboração própria.

4 RESULTADOS

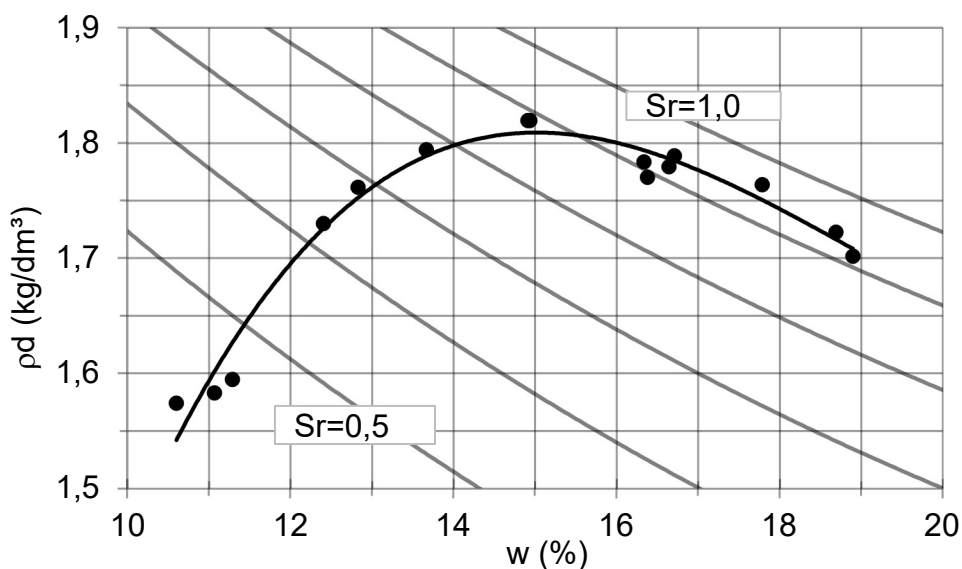
Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados da pesquisa.

4.1 Influência do grau e umidade de compactação na permeabilidade do solo

Como foi visto no decorrer deste trabalho, fatores como índice de vazios e o grau de saturação na moldagem exercem grande influência na permeabilidade dos solos. Também se sabe que estes fatores estão diretamente relacionados com a curva de compactação dos solos. A partir disto, buscou-se relacionar o coeficiente de permeabilidade do solo com a curva de compactação dinâmica do mesmo.

Na Figura 25 é apresentada a curva de compactação obtida na energia normal para o solo estudado. Também nela são representadas as curvas de saturação entre os graus de saturação de 50% e 100%, intervaladas a cada 10%. Na curva de compactação é possível observar que a densidade seca máxima do solo se encontra entorno de $1,81 \text{ kg/dm}^3$ e o teor de umidade ótima fica em torno de 15%.

Figura 25 - Curva de compactação dinâmica.

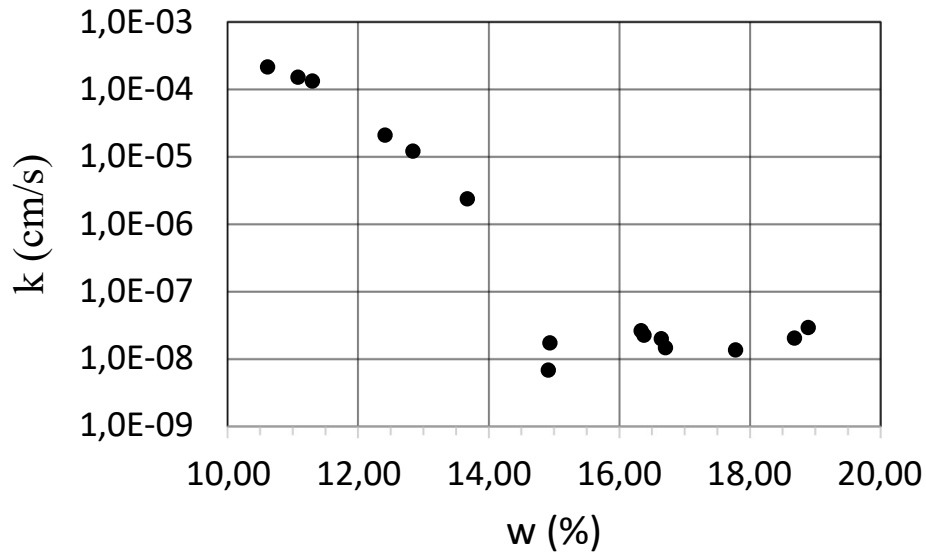


Fonte: elaboração própria.

Foi realizado o estudo do comportamento da permeabilidade em todos os 16 pontos da curva de compactação dinâmica, para com isto compreender o comportamento do coeficiente de permeabilidade ao longo da curva e avaliar a

influência da umidade de compactação na permeabilidade do solo. Na Figura 26 é apresentada a curva de permeabilidade em função da umidade de compactação para o método dinâmico. Os resultados em valores estão apresentados na Tabela 9.

Figura 26 - Curva de permeabilidade para o método dinâmico.



Fonte: elaboração própria.

Tabela 9 - Densidade seca e coeficiente de permeabilidade na compactação dinâmica.

w (%)	ρ_d (kg/dm ³)	k (cm/s)
10,60	1,57	2,19E-04
11,06	1,58	1,53E-04
11,29	1,60	1,34E-04
12,40	1,73	2,10E-05
12,83	1,76	1,21E-05
13,66	1,79	2,36E-06
14,91	1,82	6,71E-09
14,93	1,82	1,71E-08
16,33	1,78	2,58E-08
16,38	1,77	2,23E-08
16,64	1,78	1,97E-08
16,71	1,79	1,44E-08
17,78	1,76	1,33E-08
18,69	1,72	2,00E-08
18,89	1,70	2,89E-08

Fonte: elaboração própria.

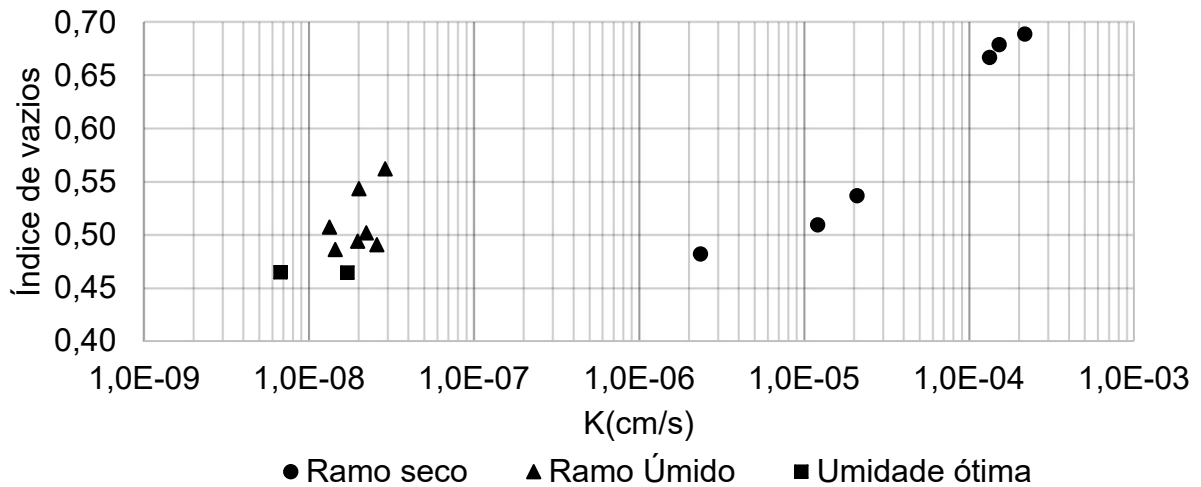
A curva de permeabilidade resultante deste solo comporta-se de maneira semelhante a apresentada na seção 2.2.2. Nela é possível perceber a grande diferença de comportamento que o coeficiente de permeabilidade apresenta entre um solo compactado no ramo seco da curva de compactação e no ramo úmido da mesma.

No ramo seco, à medida que o grau de compactação aumenta a permeabilidade diminui, o que pode ser justificado pelo fato da redução do índice de vazios. Próximo ao ponto de umidade ótima é onde a permeabilidade atinge seu menor valor. Já a partir da umidade ótima, ao longo do ramo úmido, o coeficiente de permeabilidade apresentou pouca variação nos diferentes pontos.

A partir da comparação entre os valores de permeabilidade com a curva de compactação da Figura 25, pode-se perceber que a permeabilidade apresentou maior variabilidade à medida que os pontos se localizavam em diferentes curvas de saturação. O ramo seco passa pelas curvas de saturação quase que perpendicularmente, e à medida que se muda o intervalo de saturação, em que o ponto se encontra, a permeabilidade varia de forma considerável. Já o ramo úmido é formado paralelamente a curva de saturação de 90% e os pontos apresentam valores bem semelhantes de permeabilidade.

Pontos de mesmo índice de vazios em ramos diferentes da curva de compactação, apresentam valores distintos de coeficiente de permeabilidade, como pode ser visto na Figura 27. Este comportamento apresentado pelo solo pode ser explicado pela forma da estrutura gerada em solos argilosos, em que, ao longo da curva de compactação, no ramo seco é formada uma estrutura floculada e no ramo úmido estrutura dispersa, como descrito por Lambe e Whitman (1969) e representado na Figura 5. Apesar do solo não ser puramente argiloso, segundo Marsal e Fuentes (1955, apud Maiolino, 1985), frações de argila a partir de 30%, são suficientes para comandar o comportamento do solo.

Figura 27 - Índice de vazios x coeficiente de permeabilidade, na compactação dinâmica.



Fonte: elaboração própria.

A partir dos resultados obtidos pode-se notar que no tocante ao coeficiente de permeabilidade em solos compactados dinamicamente, o grau de saturação no momento da compactação é um fator tão importante quanto o índice de vazios. Com esta consideração, se um solo compactado para controle de permeabilidade, como por exemplo núcleos de barragens, torna-se mais atrativo a compactação com um teor de umidade um pouco acima do teor ótimo, se não houver um controle rigoroso da umidade de compactação.

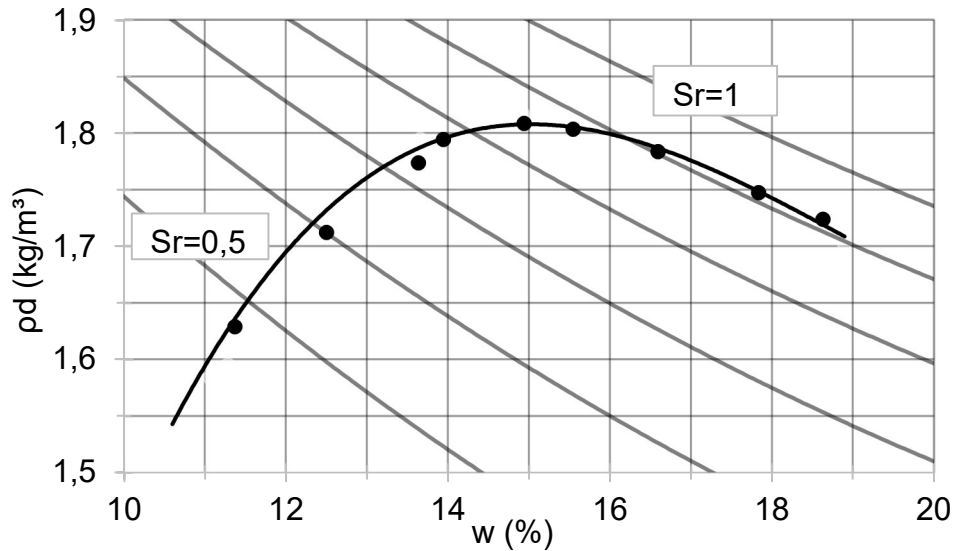
4.2 Influência do modo de compactação na permeabilidade do solo

Como foi visto na seção 4.1, a estrutura gerada em um solo, no momento da compactação, tem grande influência no coeficiente de permeabilidade do mesmo. Segundo Rico e Del Castilho (2005), em relação a estrutura do solo, nenhum tipo de compactação em campo é representativo da compactação estática de laboratório, em todos os processos de compactação em campo é criado um maior ou menor grau de dispersão das partículas argilosas.

Apesar disso, a compactação estática é muito utilizada em laboratório, para moldagem de corpos de prova de diversos tipos de ensaio, como de: compressão simples, cisalhamento, permeabilidade.

Na Figura 28 são apresentados os pontos da curva que foram moldados através da compactação estática, e sobrepostos na linha de tendência da curva de compactação dinâmica. Pode-se notar que os pontos compactados em energia estática chegaram muito próximos da curva dinâmica.

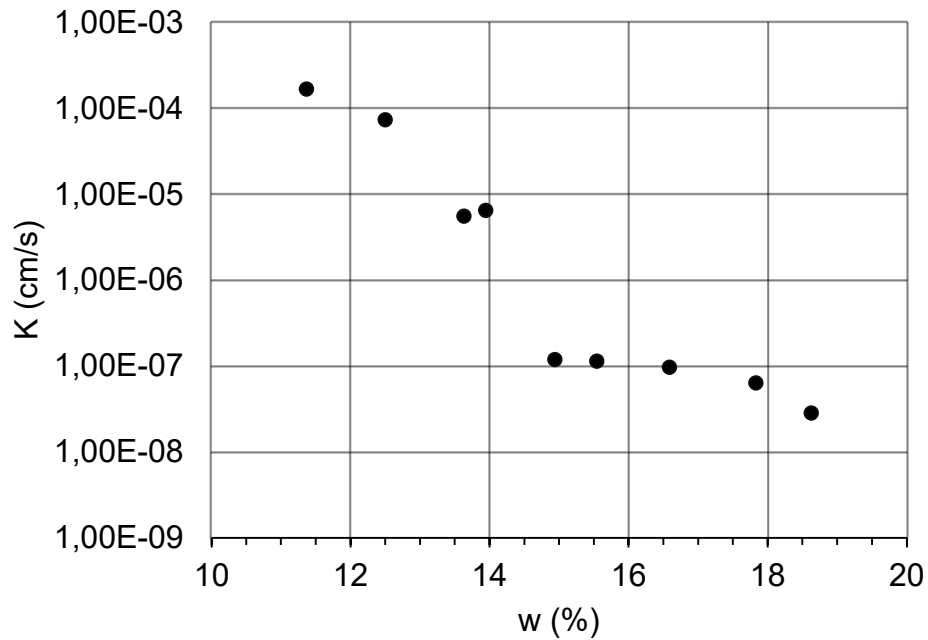
Figura 28 - Curva de compactação estática.



Fonte: elaboração própria.

Assim como no ensaio de compactação dinâmica, na compactação estática também foi realizado o estudo do coeficiente de permeabilidade ao longo da curva de compactação. Sendo 4 pontos no ramo seco, um ponto na umidade ótima e 4 pontos no ramo úmido. Na Figura 29 é apresentada a curva de permeabilidade para este método de compactação, e na Tabela 10 são apresentados os valores em cada ponto da curva.

Figura 29 - Curva de permeabilidade para o método estático.



Fonte: elaboração própria.

Tabela 10 - Densidade seca e coeficiente de permeabilidade na compactação estática.

W (%)	ρ_d (kg/dm ³)	k (cm/s)
11,37	1,63	1,69E-04
12,50	1,71	7,39E-05
13,63	1,77	5,59E-06
13,94	1,79	6,55E-06
14,94	1,81	1,19E-07
15,54	1,80	1,14E-07
16,59	1,78	9,73E-08
17,83	1,75	6,37E-08
18,63	1,72	2,85E-08

Fonte: elaboração própria.

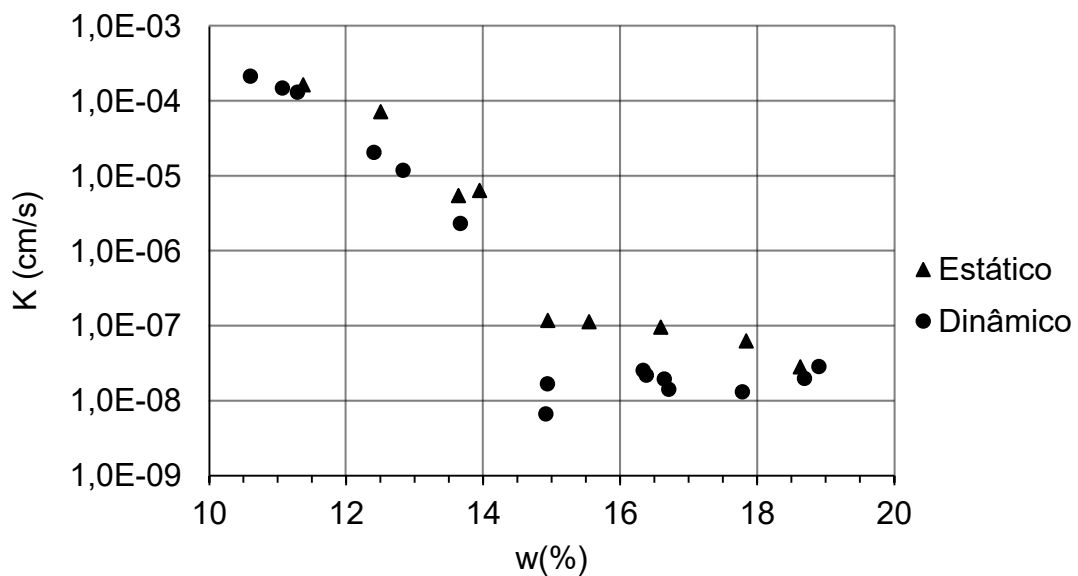
A curva de permeabilidade do solo compactado estaticamente apresentou um comportamento próximo ao de quando o solo foi compactado dinamicamente, com algumas diferenças que serão comentadas. Neste método a curva de permeabilidade também apresenta grandes diferenças entre o ramo úmido e o ramo seco da curva de compactação.

No ramo seco, o coeficiente de permeabilidade teve o mesmo comportamento do solo compactado dinamicamente. Onde com o decréscimo do índice de vazios e aumento do teor de umidade, houve também a redução do coeficiente de

permeabilidade. Porém neste método o ponto em que o solo foi compactado na umidade ótima, atingindo o menor índice de vazios entre os pontos, não apresentou o menor coeficiente de permeabilidade, que foi encontrado no ramo úmido da curva de compactação. Em teores de umidade acima da umidade ótima, o coeficiente de permeabilidade continuou reduzindo com o aumento do teor de umidade, mesmo com o aumento do índice de vazios.

Na Figura 30 são apresentadas as duas curvas sobrepostas para uma melhor visualização das diferenças entre as duas.

Figura 30 - Curvas de permeabilidade sobrepostas.



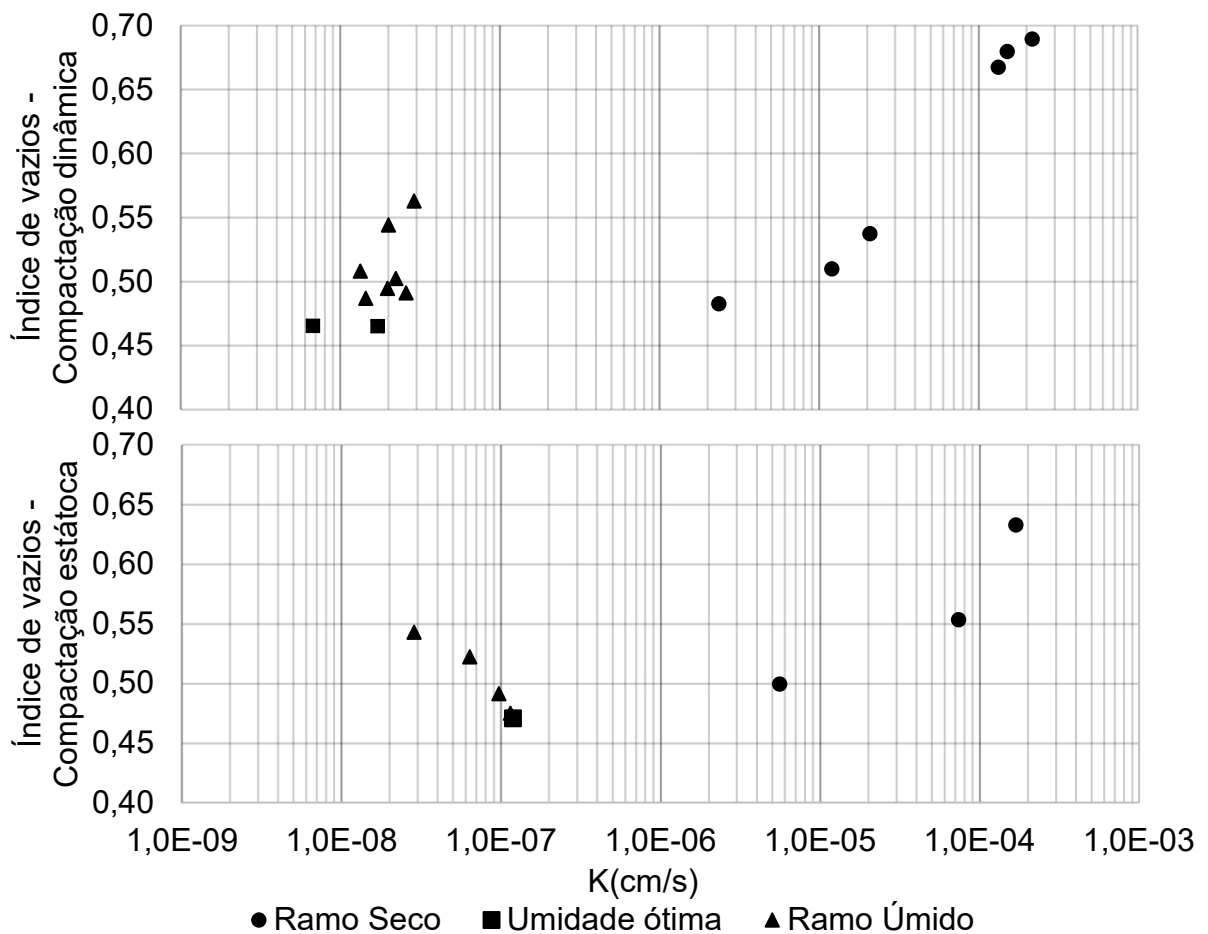
Fonte: elaboração própria.

Primeiramente, é possível notar que em todos os pontos das curvas, a compactação dinâmica apresenta menor coeficiente de permeabilidade, o que pode ser justificado devido a compactação estática gerar uma estrutura menos dispersa do que a dinâmica, como citado na seção 2.2.3.2. Visto que pontos de mesmo teor de umidade na moldagem e mesmo índice de vazios, como pode ser visto na Figura 31, apresentam valores diferentes de permeabilidade.

Também é possível notar a diferença de comportamento entre os ramos úmidos dos dois métodos, onde o método dinâmico apresentou um leve aumento na permeabilidade. Já a curva da compactação estática continuou apresentando redução no coeficiente de permeabilidade após a umidade ótima. Isto também pode ser explicado pela forma de estrutura gerada pelo aumento da umidade e pelo método de

compactação, onde no método estático, que apresenta menor grau de dispersão das partículas, quando na umidade ótima, ainda não atingiu o seu máximo grau de dispersão, então com o aumento da umidade de compactação também há o aumento na dispersão das partículas, contribuindo para um menor valor do coeficiente de permeabilidade.

Figura 31 - Índice de vazios x Coeficiente de permeabilidade



Fonte: elaboração própria.

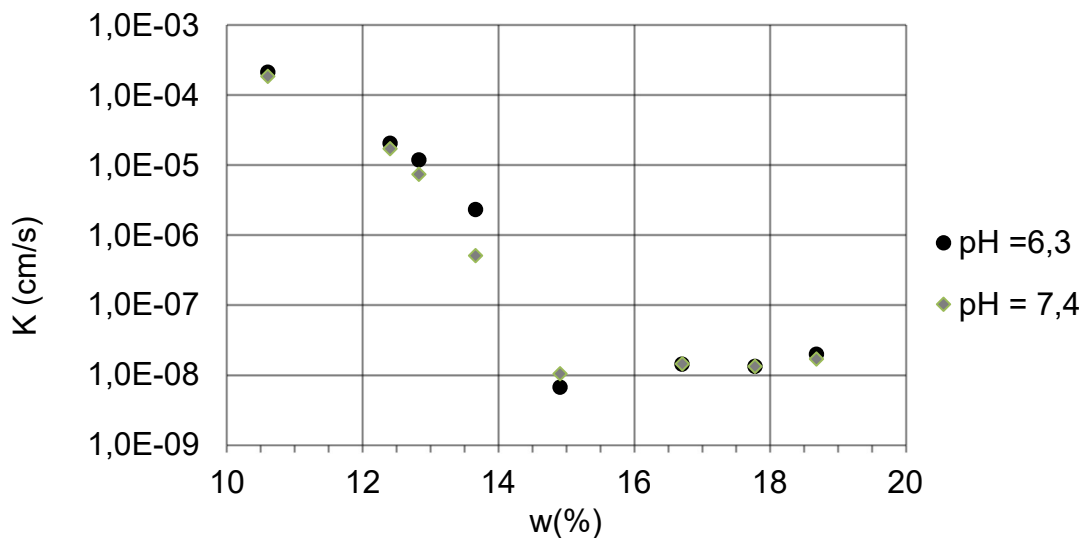
4.3 Influência do pH da água na permeabilidade

Até o presente momento foi possível realizar parcialmente o ensaio de permeabilidade com adição de calcário, que foi o primeiro fertilizante a ser utilizado. Devido ao fato que o pH da água na saída dos permeômetros do ramo seco da curva de compactação, que são os de maior fluxo, no momento encontram-se em aproximadamente 7,4, e o pH da entrada em torno de 9,0.

No ramo úmido da curva de compactação, não foi possível até o momento a leitura do pH na saída do permeâmetro, pois a água sai em pouca quantidade, não sendo possível acumular quantidade suficiente para a utilização do pHmetro.

Na Figura 32, é apresentada a curva de permeabilidade dos pontos que foi adicionada água com calcário e também a curva com água destilada de pH=6,3. Pode-se notar que até o momento não se teve variações significativas no coeficiente de permeabilidade do solo, com a adição de calcário. Apesar de se ter poucos resultados, a não influencia do pH na permeabilidade pode ocorrer pelo fato de que o índice de atividade da argila presente no solo, que indica o quão influente são as propriedades químicas da fração de argila no comportamento do solo, é de aproximadamente 0,29, o que classifica a mesma segundo Skempton (1953), como uma argila inativa ($I_a \leq 0,75$).

Figura 32 - Curva de permeabilidade com adição de calcário.



Fonte: elaboração própria.

4.4 Análise da vazão em barragens com diferentes umidades de compactação

Foram realizadas as análises das vazões nas quatro configurações de barragens citadas na Seção 3.2.5, com o intuito de avaliar a quantidade de água que é perdida em cada situação, buscando-se o equilíbrio entre a situação de menor vazão, a de maior facilidade de execução e a mais estável.

Na Tabela 11, são apresentados os resultados da vazão em cada situação analisada.

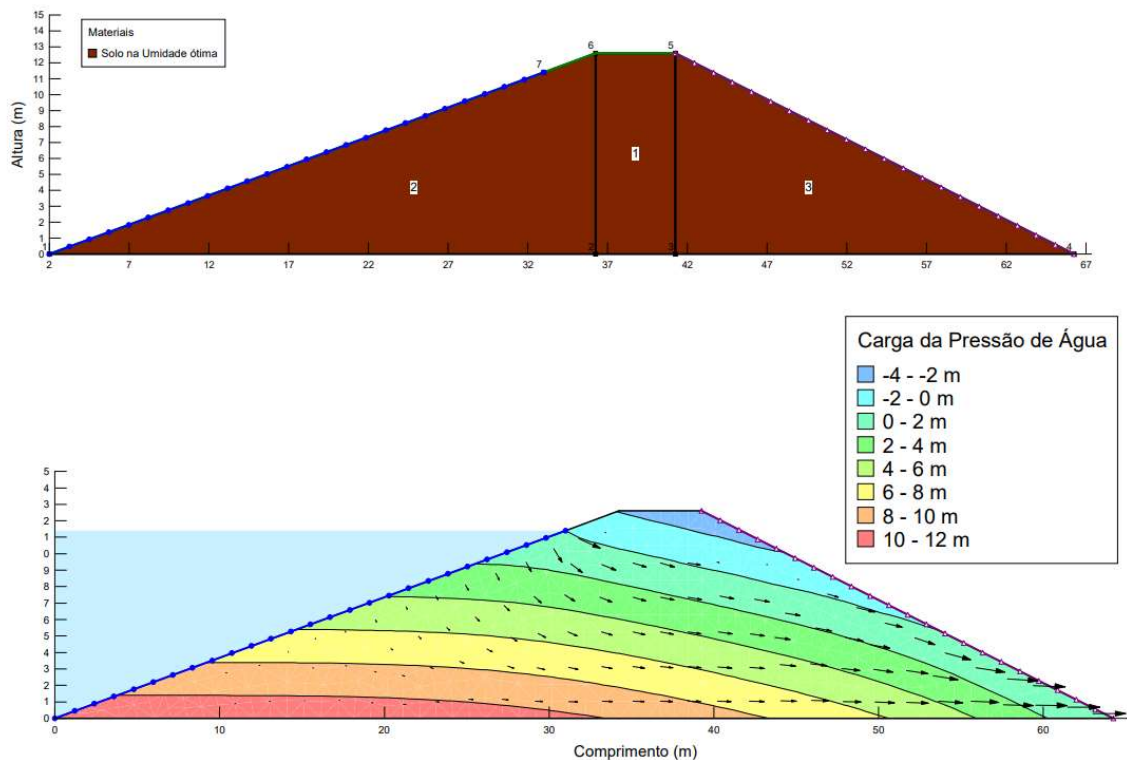
Tabela 11 - Vazões das simulações.

Nº	Barragem Configuração	Vazão (m ³ /s)	Vazão (L/mês)
1	Homogênea na umidade ótima	1,34E-08	34,66
2	Homogênea na umidade 1,5% acima da ótima	3,92E-08	101,71
3	Zoneada - núcleo na umidade ótima e taludes 1,5% abaixo	8,89E-08	230,37
4	Zoneada - núcleo 1,5% acima da umidade ótima e taludes 1,5% abaixo	2,53E-07	655,78

Fonte: elaboração própria.

Primeiramente foi modelada a barragem 1 (Figura 33), em condição de umidade ótima de compactação, e a partir disso buscou-se fazer uma análise comparativa entre a mesma e os outros modelos.

Figura 33 - Barragem 1: homogênea, umidade ótima.



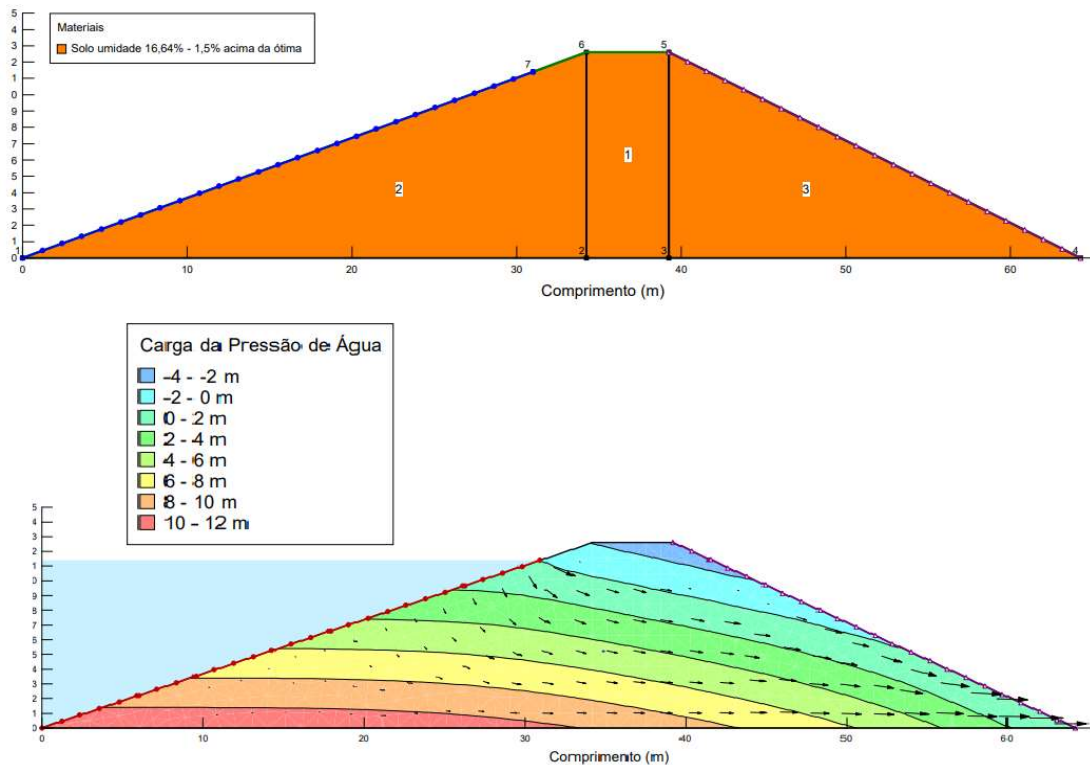
Fonte: elaboração própria.

A partir dos resultados obtidos pode-se notar que:

- Na segunda situação de barragem homogênea (Figura 34), teve se uma diferença na vazão de aproximadamente 2,9 vezes em relação a barragem 1. Entre

os dois casos, para controle de vazão, torna-se mais vantajoso compactar a barragem na umidade de 1,5% acima da ótima quando não houver um controle adequado da umidade de compactação, para serem reduzidos os riscos de compactar-se no ramo seco.

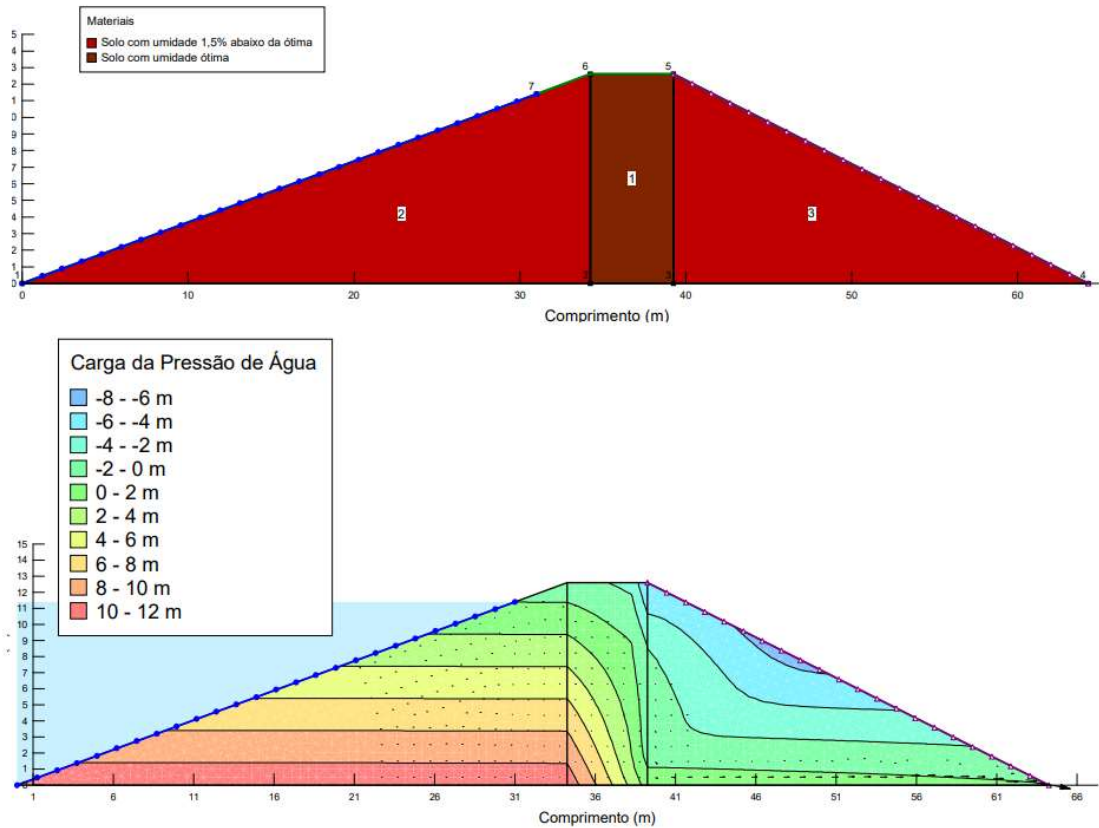
Figura 34 - Barragem 2: Homogênea, umidade 15% acima da ótima.



Fonte: elaboração própria.

- A barragem 3 (Figura 35), tem seus taludes em umidade abaixo da ótima pois, segundo a FAO (2011), a estrutura floclada que é criada pela compactação com baixo grau de saturação, gera uma maior resistência ao cisalhamento. Esta configuração de barragem torna-se uma boa opção se constatado o maior valor de resistência, e se necessário utiliza-lo para tornar a barragem mais estável, porém não é a situação ideal para controle de vazão visto que sua vazão é de aproximadamente 6,6 vezes maior que a condição ideal, mesmo com o núcleo compactado na umidade ótima.

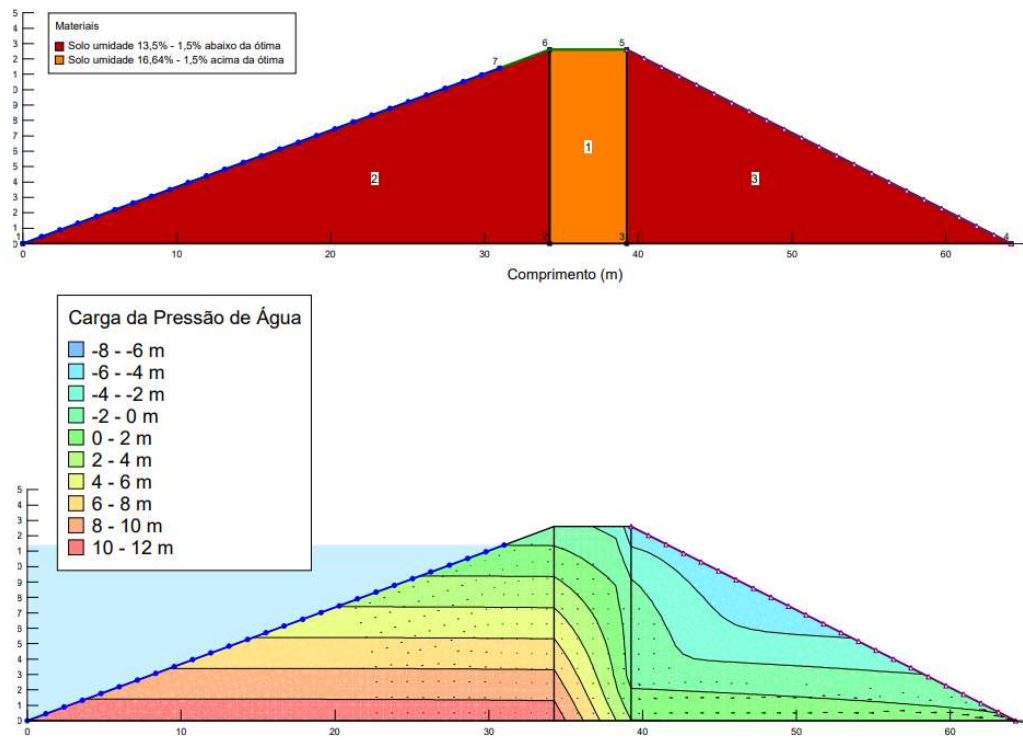
Figura 35 - Barragem 3: Zoneada, núcleo na umidade ótima e taludes 1,5% abaixo.



Fonte: elaboração própria.

- A barragem 4 (Figura 36), foi modelada com os taludes compactados em umidade de 1,5% abaixo da ótima, com o mesmo intuito da barragem 3, de melhorar a resistência. E em seu núcleo foi utilizado o solo compactado em umidade 1,5% acima da ótima, com o mesmo objetivo da barragem 2, de diminuir problemas de permeabilidade gerado por possíveis erros na umidade de compactação. Porém em relação a vazão este modelo torna-se não tão atrativo, pois sua vazão é aproximadamente 18,9 vezes a da condição ideal.

Figura 36 - Barragem 4: zoneada, núcleo com umidade 1,5% acima da ótima, e taludes, 1,5% acima.



Fonte: elaboração própria.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O presente trabalho, teve como intuito avaliar o coeficiente de permeabilidade de um solo areno-argiloso, diante de diferentes situações, os resultados mostram que:

- A umidade de compactação é o fator que comanda o comportamento do coeficiente de permeabilidade, visto que pontos compactados em diferentes umidades, com mesmo índice de vazios, apresentaram valores completamente distintos entre si.
- No ramo seco da curva de compactação, para os dois métodos de compactação, o coeficiente de permeabilidade varia de forma proporcional ao grau de compactação.
- No ramo úmido da curva de compactação dinâmica, o coeficiente de permeabilidade aumenta levemente em relação a umidade ótima, e se mantém aproximadamente constante.
- No ramo úmido da curva de compactação estática, o coeficiente de permeabilidade continuou reduzindo com o aumento da umidade de compactação, porém em menor escala em relação ao ramo seco da mesma.
- Em todos os pontos moldados, o coeficiente de permeabilidade foi menor quando moldado em compactação estática, do que quando moldado em compactação dinâmica.
- Em relação a análise do coeficiente de permeabilidade quando percolada água em diferentes níveis de pH, não foram obtidos resultados conclusivos, pois até o momento não houve tempo suficiente para alterar mais de 1 na escala do pH na saída dos permeômetros, e pela dificuldade de se realizar leituras de pH no ramo úmido da curva de compactação, devido à pouca quantidade que é acumulada na saída.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Buscando contribuir para a construção de barragens mais seguras, sugere-se realizar os seguintes trabalhos:

- Estender o estudo da compactação para outros solos, como solos mais argilosos, que tem maior influência da estrutura, e também para solos bem mais permeáveis para observar se os efeitos do pH da água que permeia podem ser mais influentes.
- Realizar o ensaio de permeabilidade em outros métodos de compactação;
- Compactar os corpos de prova com água em diferentes níveis de pH.

REFERÊNCIAS

ABREU, R. R., **Dimensionamento e acompanhamento executivo de uma barragem de terra para irrigação – Um estudo de caso**. 2015, Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, curso de Engenharia Civil, Alegrete, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 6457**: Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ATKINS, Peter; JONES, Loretta; LAVERMAN, Leroy. **Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente**. 5ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

BOYNTON, Stephen S.; DANIEL, David E. Hydraulic conductivity tests on compacted clay. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 111, n. 4, p. 465-478, 1985.

BROWN, T. L.; LEMAY, Junior H. E.; BURSTEN, B. E.; MURPHY, C.J.; WOODWARD, P.M.; STOTLZFUS, M.W. **Química: a ciência central**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: Ltc-livros Técnicos e Científicos, 1988.

DANIEL, David E. State-of-the-art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. In: **Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil**. v. 1142, p. 30, 1994.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6 ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

FERREIRA, C., IBGE aponta aumento no uso de fertilizantes na agropecuária. **Valor Econômico**, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2012/06/18/ibge-aponta-aumento-no-uso-de-fertilizantes-na-agropecuaria.ghtml>

Food And Agriculture Organization Of The United Nations (FAO). **Manual sobre pequenas barragens de terra**. Roma, 2011.

GIPSON, A. H., Jr., "Permeability Testing on Clayey Soil and Silty Sand-Bentonite Mixture Using Acid Liquor," Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM STP 874, A. I. Johnson, R. K. Frobel, N. J. Cavalli, and C. B. Pettersson, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985, pp. 140-154.

HEAD K. H., EPPS, R. J., **Manual of soil laboratory testing - Vol. II: Permeability, Shear Strength and Compressibility tests**. 3 ed. 2011.

ICOLD – CIGB. **As barragens e a água do mundo**: Um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo. Tradução Texto Faz Comunicação S/S Ltda. Curitiba: Núcleo regional do Paraná, 2008.

LAMBE, T. William. The structure of compacted clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 84, n. 2, p. 1-34, 1958.

LAMBE, T.W., and WHITHMAN, R.V. **Soil mechanics**. John Wiley & Sons, Inc., New York. 1969.

MAIOLINO, A. L. G., **Resistência ao cisalhamento de solos compactados: Uma proposta de tipificação**. 1985. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro 1985.

MARSAL, R.J. e FUENTES DE LA ROSA, A., Mechanical properties of rockfill-soil mixtures, **Proc. XII ICOLD**, México, 1976.

Massad, F. **Obras de terra – Curso Básico de Geotecnia**. 2ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MELO, F.A.S.; MAIA, F.A.D.; MONTEIRO, S.A.; SOUSA, D.V.P; TORRES, M.S.A. **Análises de parâmetros físico-químico da água da Barragem de Santa Cruz Apodi/RN** – PH, alcalinidade e dureza total. 4ª Semana de Química – IFRN, 2016.

MESRI, Gholamreza; OLSON, Roy E. Mechanisms controlling the permeability of clays. **Clays and Clay minerals**, v. 19, n. 3, p. 151-158, 1971.

MITCHELL, J.K., SOGA, K., **Fundamentals of Soil Behavior**. 3 ed., John Wiley & Sons, Hoboken, 2005.

NEVES, E.M. **The Influence of Negative Pore Water Pressures on the Strength Characteristics of Compacted Soils**. National Laboratory of Civil Engineering Lisbon. 1971. Translated by: F. Amuchoisteghi and D.G. Fredlund.

NEVES, M.A.; MACEDO, L.C.B.; FONSECA, L.C.; ALVES, J.P.H.; Qualidade da água do reservatório Jaime Umbelino – Barragem do Poxim/Sergipe. **Interfaces Científicas-Saúde e Ambiente**, v. 5, n. 1, p. 81-94, 2016.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PORAN, Chaim J.; RODRIGUEZ, Jorge A. Design of dynamic compaction. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 29, n. 5, p. 796-802, 1992.

POZZEBON, B.H. **Parâmetros de solos residuais compactados da Região Metropolitana de São Paulo**: comparação com dados de outras localidades no Brasil. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2017.

RAHMAN, Fashiur. **Hydraulic conductivity and chemical compatibility of some Victorian soils used as liners for waste containment**. 2000. Ph.D. thesis, School of the Built Environment, Victoria University of Technology, Melbourne, Australia.

REDDY, Venkatarama; JAGADISH, K. S. The static compaction of soils. **Géotechnique**, v. 43, n. 2, p. 337-41, 1993.

Rico, A. R., & Castillo, H. d. **La ingeniería de los suelos en las vías terrestres. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas**. Editorial Limusa, Mexico, 460p. 2005.

SANTOS, R.H.G., SANTOS, N.B.C., SILVA, M.H.M., NARCISO, M.L., OLIVEIRA, A.F.M., **Análise de parâmetros físico-químicos das águas nas barragens do semiárido de Pernambuco e das barragens da região metropolitana do Recife segundo o CONAMA 357/0**. I Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido – CONIDIS 2016

SEED, Harry Bolton; CHAN, C. K. Structure and strength characteristics of compacted clays. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 85, n. 5, p. 87-128, 1959.

SKEMPTON, A. W. The colloidal activity of clays. **Selected papers on soil mechanics**, p. 106-118, 1953.

SHACKELFORD, Charles D. Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity. In: **Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil**. ASTM International, 1994.

Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley & Sons. 1996.

TRANI, P. E.; TRANI, A. L. **Fertilizantes: Cálculo de Fórmulas Comerciais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2011.

WERK, S.M.S. **Estudo da Influência dos Métodos de Compactação no Comportamento Resiliente dos Solos.** Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, 103 p. 2000.