



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**OTAVIO ALVES NOGUEIRA**

**DETERMINAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO PREDITIVO PARA A**  
**ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE SOLOS ARENOSOS**

**FORTALEZA**

**2019**

OTAVIO ALVES NOGUEIRA

DETERMINAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO PREDITIVO PARA A ESTIMATIVA  
DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE SOLOS ARENOSOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- N713d Nogueira, Otavio Alves.  
Determinação de modelo matemático preditivo para a estimativa do coeficiente de permeabilidade de solos arenosos / Otavio Alves Nogueira. – 2019.  
120 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.
1. Solos arenosos. 2. Coeficiente de permeabilidade. 3. Modelo preditivo. I. Título.

CDD 620

---

OTAVIO ALVES NOGUEIRA

DETERMINAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO PREDITIVO PARA A ESTIMATIVA  
DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE SOLOS ARENOSOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 04 / 12 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Mariana Vela Silveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Ivonilda e Olavo.

Às minhas sobrinhas, Lis e Williane.

E à minha futura esposa, Giovanna.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo seu infinito sustento, saúde e força que me trouxe até aqui.

Ao meu professor orientador Dr. Rosiel Ferreira Leme, pela sua competência, dedicação ao ensino, disponibilidade, paciência e motivação para elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, Ivonilda e Olavo, que mesmo em períodos de dificuldade continuaram me motivando a seguir estudando para o meu sucesso profissional.

Aos meus irmãos, pelo carinho, cada um de sua forma.

À minha futura esposa, Giovanna, pelo seu amor, ajuda, orações e conselhos em meio a este processo de transição entre a vida acadêmica e a profissional.

Aos amigos, em especial, Thaysa, Eratano, Tiago, Patrick, Israel, entre tantos outros que acompanharam e me ajudaram fortemente na graduação.

“Uma resposta aproximada para o problema certo vale muito mais do que uma resposta exata para um problema aproximado.”

**John Wilder Tukey**

## RESUMO

Os solos arenosos são comumente usados em obras de engenharia, seja em barragens de terra, obras de contenção, estradas, entre outros, para fins de drenagem e obras correlatas. Desta forma, é de suma importância conhecer as características do material a ser empregado na obra, principalmente no que diz respeito a sua condutividade hidráulica. No intuito de estimar a coeficiente de permeabilidade de solos arenosos, alguns pesquisadores como Hazen (1930), Kozeny-Carman (1938), Carrier (2003) e Chapuis (2004) determinaram modelos matemáticos no qual correlacionava parâmetros básicos de caracterização com a condutividade hidráulica. Diante disto, este trabalho tem como objetivo principal determinar uma nova formulação matemática mais eficiente, para estimativa do coeficiente de permeabilidade de materiais arenosos, através de análise estatística. Para esta pesquisa, selecionou-se sete amostras arenosas, determinando os valores de permeabilidade sob carga constante para diferentes índices de vazios. O estudo também contou com uma adaptação do aparato necessário aos ensaios de adensamento e permeabilidade, realizando-se os dois ensaios em um mesmo equipamento. A partir dos resultados dos ensaios obtidos, foram avaliados diversos parâmetros que poderiam influenciar para o modelo matemático, e, por um processo iterativo utilizando a ferramenta computacional *Solver*®, foi determinado a equação empírica para o estudo proposto. Com a finalidade de avaliar o modelo desenvolvido nesta pesquisa, fez-se um comparativo da determinação do coeficiente de permeabilidade pela equação desta pesquisa em relação as diferentes equações disponíveis na literatura, identificando que a equação proposta apresenta um erro menor que as demais equações matemáticas. Para validação do modelo empírico proposto, os parâmetros de uma amostra distinta foram usados para verificar a precisão do modelo em estudo e compará-lo à outras metodologias. Os resultados obtidos pelo modelo mostraram-se satisfatórios, também apresentando um erro consideravelmente menor em relação aos outros métodos encontrados na literatura.

**Palavras-chave:** Solos arenosos. Coeficiente de permeabilidade. Modelo preditivo.



## ABSTRACT

Sandy soils are commonly used in engineering works, whether in earth dams, containment works, roads, among others, for drainage and related works. Thus, it is of utmost importance to know the characteristics of the material to be used in the work, especially with regard to its hydraulic conductivity. In order to estimate the permeability coefficient of sandy soils, some researchers such as Hazen (1930), Kozeny-Carman (1938), Carrier (2003) and Chapuis (2004) determined mathematical models in which they correlated basic characterization parameters with hydraulic conductivity. Given this, this work has as main objective to determine a new more efficient mathematical formulation to estimate the permeability coefficient of sandy materials, through statistical analysis. For this research, seven sandy samples were selected, determining the permeability values under constant load for different voids indices. The study also included an adaptation of the necessary apparatus to the densification and permeability tests, both tests being performed in the same equipment. From the results of the obtained tests, several parameters that could influence the mathematical model were evaluated, and by an interactive process using the Solver<sup>®</sup> computational tool, the empirical equation for the proposed study was determined. In order to evaluate the model developed in this research, we compared the determination of the permeability coefficient by the equation of this research in relation to the different equations available in the literature, identifying that the proposed equation presents a smaller error than the other mathematical equations. To validate the proposed empirical model, the parameters of a distinct sample were used to verify the accuracy of the model under study and to compare it with other methodologies. The results obtained by the model were satisfactory, also presenting a considerably smaller error in relation to the other methods found in the literature.

**Keywords:** Sandy soils. Permeability coefficient. Predictive models.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Erro médio do modelo matemático e dados reais .....	15
Figura 2 – Esquema de percolação de água em um permeâmetro.....	20
Figura 3 – Ensaio permeâmetro de carga direta .....	22
Figura 4 – Ensaio permeâmetro de carga variável.....	23
Figura 5 – Variação $k \times S$ .....	27
Figura 6 – Desvio dos dados em relação ao modelo de regressão.....	37
Figura 7 – Amostras coletadas.....	42
Figura 8 – Picnômetros com amostra de solo.....	45
Figura 9 – Preparação da amostra no molde.....	47
Figura 10 – Procedimento para determinação do índice de vazios máximo .....	47
Figura 11 – Procedimento para determinação do índice de vazios máximo .....	48
Figura 12 – Conjunto ensaio do tipo B1 .....	50
Figura 13 – Prensa de adensamento.....	51
Figura 14 – Célula de adensamento.....	52
Figura 15 – Etapas da montagem do corpo de prova.....	52
Figura 16 - Etapas da montagem do corpo de prova .....	53
Figura 17 – Adaptação do ensaio de permeabilidade e edométrico .....	54
Figura 18 – Carreamento de material no ensaio de permeabilidade.....	55
Figura 19 – Procedimento de compactação da amostra.....	58
Figura 20 – Fração granulométrica AM01 .....	84
Figura 21 - Fração granulométrica AM02 .....	84
Figura 22 – Fração granulométrica AM03 .....	85
Figura 23 - Fração granulométrica AM04 .....	85
Figura 24 - Fração granulométrica AM05 .....	86
Figura 25 - Fração granulométrica AM07 .....	86
Figura 26 - Fração granulométrica amostra de validação.....	87

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo dos valores de permeabilidade entre Hazen x Laboratório x Modelo proposto .....	64
Gráfico 2 - Comparativo dos valores de permeabilidade entre Chapuis x Laboratório x Modelo proposto .....	66
Gráfico 3 - Comparativo dos valores de permeabilidade entre Kozeny-Carman x Laboratório x Modelo proposto.....	67
Gráfico 4 - Comparativo dos resultados de permeabilidade da amostra de validação .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos sedimentares segundo Pinto (2006) .....	30
Tabela 2 – Valores usuais de K segundo Massad (2006) .....	30
Tabela 3 – Valores típicos de K segundo Harr (1990) .....	31
Tabela 4 – Valores típicos de K segundo Chiossi (2013).....	31
Tabela 5 – Série de peneiras para o ensaio de granulometria.....	43
Tabela 6 – Resultado geral dos ensaios .....	59
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de índice vazios máximos e mínimos de cada amostra de solo.....	60
Tabela 8 – Comparação dos resultados de permeabilidade entre ensaios de laboratório e o modelo obtido .....	61
Tabela 9 – Comparação do erro entre Hazen e o modelo proposto em relação aos ensaios de laboratório.....	63
Tabela 10 – Comparação do erro entre Chapuis e o modelo proposto em relação aos ensaios de laboratório.....	64
Tabela 11 – Comparação do erro entre Kozeny-Carman e o modelo proposto em relação aos ensaios de laboratório .....	66
Tabela 12 – Parâmetros da amostra de validação .....	68
Tabela 13 – Coeficiente de permeabilidade pelo ensaio de laboratório e modelo preditivo com seus respectivos erros .....	68
Tabela 14 – Coeficiente de permeabilidade pelo ensaio de laboratório e método de Hazen com seus respectivos erros .....	69
Tabela 15 – Coeficiente de permeabilidade pelo ensaio de laboratório e método de Chapuis com seus respectivos erros.....	69
Tabela 16 – Coeficiente de permeabilidade pelo ensaio de laboratório e método de Kozeny-Carman com seus respectivos erros .....	69

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1</b>	<b>Considerações iniciais</b> .....	14
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	15
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b> .....	16
<b>1.3.1</b>	<i>Geral</i> .....	16
<b>1.3.2</b>	<i>Específicos</i> .....	16
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Condutividade hidráulica</b> .....	18
<b>2.1.1</b>	<i>Conservação de energia</i> .....	19
<b>2.1.2</b>	<i>Lei de Darcy</i> .....	19
<b>2.2</b>	<b>Ensaio de permeabilidade</b> .....	21
<b>2.3</b>	<b>Fatores de influência na permeabilidade dos solos</b> .....	24
<b>2.3.1</b>	<i>Influência do estado do solo e tamanho dos grãos</i> .....	25
<b>2.3.2</b>	<i>Influência do grau de saturação do solo</i> .....	26
<b>2.3.3</b>	<i>Influência do arranjo estrutural das partículas</i> .....	27
<b>2.3.4</b>	<i>Influência da temperatura</i> .....	28
<b>2.3.5</b>	<i>Influência do tipo de fluido</i> .....	29
<b>2.3.6</b>	<i>Influência da composição mineralógica do solo</i> .....	29
<b>2.4</b>	<b>Valores usuais de coeficientes de permeabilidade para tipos de solos diferentes</b> .	30
<b>2.5</b>	<b>Modelos empíricos de condutividade hidráulica</b> .....	31
<b>2.6</b>	<b>Modelos estatísticos</b> .....	35
<b>2.6.1</b>	<i>Regressão linear simples</i> .....	36
<b>2.6.2</b>	<i>Regressão não linear</i> .....	38
<b>2.6.2.1</b>	<i>Aplicabilidade e verificação do modelo</i> .....	39
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	41
<b>3.1</b>	<b>Descrição das amostras</b> .....	41
<b>3.2</b>	<b>Descrição dos ensaios</b> .....	43
<b>3.2.1</b>	<i>Granulometria</i> .....	43
<b>3.2.2</b>	<i>Densidade real</i> .....	44
<b>3.2.3</b>	<i>Índice de vazios máximo e mínimo</i> .....	46

3.2.3.1	<i>Determinação do índice de vazios máximo</i>	46
3.2.3.2	<i>Determinação do índice de vazios mínimo</i>	49
3.2.4	<b>Adensamento edométrico</b>	51
3.2.5	<b>Permeabilidade</b>	54
3.3	<b>Equação para estimativa do coeficiente de permeabilidade</b>	55
3.4	<b>Método de validação do modelo preditivo</b>	57
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	59
4.1	<b>Resultado geral dos ensaios</b>	59
4.2	<b>Modelo preditivo</b>	60
4.3	<b>Comparação com outras metodologias</b>	62
4.4	<b>Validação da equação</b>	68
5	<b>CONCLUSÕES</b>	71
5.1	<b>Conclusões</b>	71
5.2	<b>Sugestões para pesquisas futuras</b>	72
	<b>REFERÊNCIAS</b>	73
	<b>APÊNDICE A – RESULTADO DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA</b>	76
	<b>APÊNDICE B – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DO ENSAIO GRANULOMÉTRICO</b>	84
	<b>APÊNDICE C – RESULTADO DOS ENSAIOS DE DENSIDADE REAL DOS GRÃOS</b>	88
	<b>APÊNDICE D – RESULTADO DOS ENSAIOS EDMÉTRICOS</b>	89
	<b>APÊNDICE E – RESULTADO DOS ENSAIOS ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO E MÍNIMO</b>	117
	<b>APÊNDICE F – RESULTADO DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE</b>	118
	<b>APÊNDICE G – RESULTADO DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE PARA A AMOSTRA DE VALIDAÇÃO</b>	119

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

Os solos arenosos são comumente usados em obras de engenharia, seja em barragens de terra, obras de contenção, estradas, entre outros, para fins de drenagem e obras correlatas. Desta forma, é de suma importância conhecer as características do material a ser empregado na obra, principalmente no que diz respeito ao seu grau de permeabilidade. Porém, a obtenção das propriedades de percolação é feita a partir de testes de laboratório, no qual requer tempo e esforços consideráveis.

Para a avaliação inicial da adequação dos materiais de empréstimo para uma obra, o uso de modelo preditivo pode ser muito útil, permitindo ao projetista tomar conhecimento das características geotécnicas de permeabilidade do material estudado, e, por exemplo, proporcionar agilidade ao projeto na fase de estudos preliminares.

Muitos pesquisadores, através de seus estudos, como Hilf (1956), Wang e Huang (1984), Gurgut e Sridharan (2004), Omar *et al.* (2003) e Di Matteo *et al.* (2009), por meio de ensaios básicos de caracterização, determinaram modelos empíricos que correlacionam algumas propriedades geotécnicas para obtenção de parâmetros de compactação e consistência de solos. Outros estudos como os de Hazen (1930), Kozeny-Carman (1938), Carrier (2003) e Chapuis (2004), as características geotécnicas correlacionadas motivaram a identificação de modelos que permitem avaliar propriedades de percolação.

Assim, modelos preditivos elaborados a partir de regressão não linear podem ser criados e otimizados para estimar propriedades de percolação de solos. De acordo com Zeviani, Júnior e Bonat (2013), a aplicação destes modelos são largamente usados nas mais diversas áreas do conhecimento e podem ser empregados na engenharia geotécnica, ao mesmo tempo em que podem ser ajustados conforme o problema e aprimorados computacionalmente.

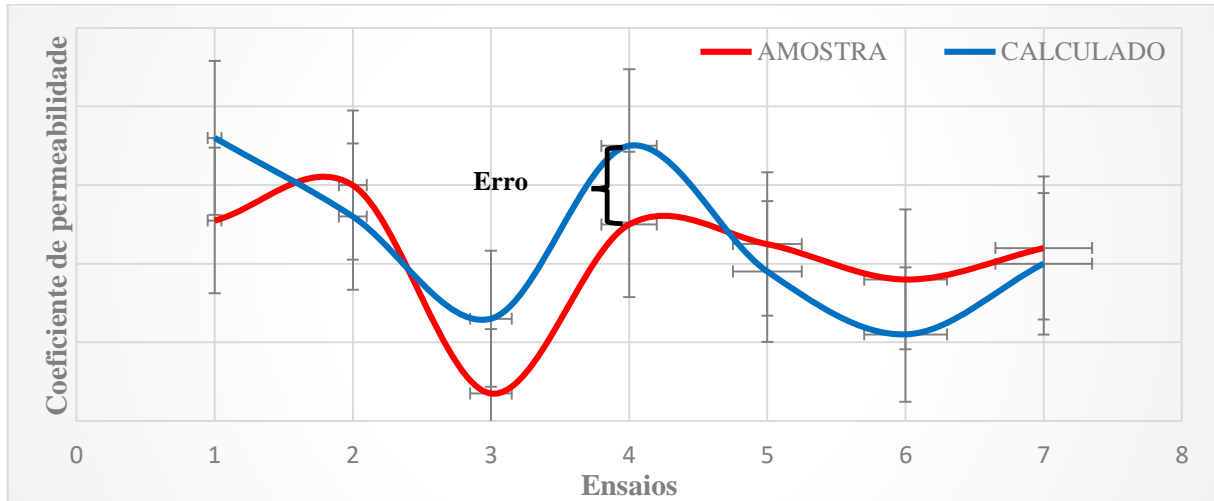
Estes modelos correlacionam parâmetros geotécnicos, seguindo o modelo de regressão não linear, conforme apresenta a Equação 1, a seguir:

$$k = C (a_0 + a_1 A^\alpha + a_2 B^\beta + \dots + a_n X^\omega)^\theta \quad (1)$$

Onde:  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_n$  são coeficientes; A, B, X representam os parâmetros geotécnicos;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\omega$ ,  $\theta$  definem potências numéricas; C define uma constante geral e K é o parâmetro de percolação.

O modelo deverá ser calibrado através da combinação dos parâmetros selecionados, buscando o menor erro possível em relação aos dados reais de ensaios de laboratório, conforme mostra a Figura 1, a seguir:

Figura 1 – Erro médio do modelo matemático e dados reais



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Ainda, na geração da equação para obtenção dos parâmetros de permeabilidade, faz-se a necessidade do estudo das correlações empíricas, tendo como base parâmetros básicos de fácil determinação, realizando ensaios de caracterização do solo, tais como granulometria, densidade aparente e densidade real, em relação a solos arenosos.

Em síntese, o uso de modelos matemáticos pode ser extremamente útil para se obter, com agilidade, um diagnóstico das características do solo. Desta forma, este trabalho busca estimar o coeficiente de permeabilidade de solos arenosos através de uma equação empírica, mediante o uso de técnicas de regressão não linear, tendo potencial uso prático em estudos preliminares de projetos geotécnicos, concedendo celeridade a esta etapa inicial de projeto na análise e caracterização do solo.

## 1.2 Justificativa

A engenharia, crescentemente, necessita do desenvolvimento de técnicas e modelos que permitam ao projetista a elaboração de estudos de materiais com maior rapidez, mais economia, além de manter a segurança das obras projetadas. Deste ponto de vista, observa-se a



importância de novos métodos de investigação geotécnica, sendo o modelo preditivo uma alternativa para realização de trabalhos preliminares.

Os modelos preditivos são elaborados a partir de tratamento de dados estatísticos e técnicas de regressões não lineares, como aborda Zeviani, Júnior e Bonat (2013), associando uma variável resposta a uma ou mais variáveis explicativas. Aqui, as variáveis explicativas são os parâmetros do solo e a variável resposta é o coeficiente de permeabilidade.

Muitas vezes, com o uso dos métodos de estimação do coeficiente de permeabilidade já existentes, os resultados encontrados são muito discrepantes aos valores obtidos em laboratório. Portanto, por meio deste trabalho, através de um modelo preditivo, será possível estimar o coeficiente de permeabilidade de solos arenosos de forma mais precisa, com menor erro em relação aos ensaios de laboratório. Tendo a equação elaborada seu uso em fases iniciais de projeto, como em estudos de viabilidade. A equação permitirá celeridade à fase inicial de caracterização de materiais em obras de drenagem, que contribui com menores gastos aos projetos e com precisão semelhante aos ensaios convencionais. Em contra partida, não será um método que substitua os ensaios de laboratório.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Geral***

Determinação de nova formulação matemática para estimativa do coeficiente de permeabilidade de solos arenosos.

#### ***1.3.2 Específicos***

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) Obter dados de ensaios geotécnicos realizados em solos arenosos;
- b) Identificar e selecionar os principais parâmetros geotécnicos dos solos arenosos que possuem influencia com o coeficiente de permeabilidade;
- c) Validar o modelo matemático, avaliando sua aplicabilidade.

## 1.4 Estrutura do trabalho

Este item discorre de cada capítulo presente neste trabalho, informando suas respectivas abordagens e conteúdo, para que o leitor tenha a possibilidade de compreender melhor a organização do estudo.

O primeiro capítulo refere-se à introdução, trazendo uma explicação sobre a importância da obtenção eficiente dos parâmetros geotécnicos de solos em obras de terra, sobretudo para dar mais agilidade a projetos em fase preliminar. Acrescenta ainda, pesquisas realizadas para implementação de modelos matemáticos que correlacionam diferentes características dos solos. Por final, apresenta a justificativa para o estudo, mostrando pontos importantes para elaboração de modelos preditivos para estimar o coeficiente de percolação de solos arenosos e em seguida os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica, expondo uma temática sobre permeabilidade de solos, fatores que a influenciam, ensaios de laboratório, modelos matemáticos de percolação existentes e técnicas de regressão linear e múltipla.

O terceiro capítulo explica os procedimentos e materiais usados para elaboração do modelo em estudo, desde a escolha das amostras, metodologia dos ensaios e análise de dados com auxílio de *softwares*.

No quarto capítulo são apresentados os resultados e discussões a respeito da equação desenvolvida, mostrando comparações entre modelos já existentes.

O quinto capítulo mostra as conclusões a respeito da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta as principais considerações teóricas para fundamentação do presente trabalho, apresentando considerações importantes para melhor entendimento dos aspectos abordados. Primeiramente, será dissertado sobre condutividade hidráulica, enunciando sobre a Lei de Darcy, conservação de energia, ensaios de permeabilidade, fatores que influenciam o coeficiente de percolação e seus valores usuais para cada tipo de solo.

Em seguida, são apresentadas aplicações de outros modelos empíricos de condutividade hidráulica e conceitos de modelos estatísticos e uso de técnicas de regressão não linear para elaboração de modelos preditivos.

### 2.1 Condutividade hidráulica

Segundo Cedergren (1989), a condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade ou coeficiente de Darcy, é definido como a velocidade de descarga por unidade de área sob gradiente hidráulico unitário. É um termo na lei de Darcy para fluxo laminar em meios porosos.

Os solos são permeáveis em função da existência de vazios interconectados pelos quais a água pode fluir de pontos de energia mais alta para pontos de energia mais baixa (DAS; SIVAKUGAN, 2015). Por isso, a importância do estudo dos fluxos de água no interior do solo tem sua devida relevância, caracterizando o comportamento da percolação da água para uso em resoluções em problemas de engenharia.

Pinto (2006) elencou três quesitos importantes no estudo de percolação da água, são eles:

- a) em cálculos de vazões, como na estimativa da quantidade de água que se infiltra em uma escavação;
- b) na análise de recalques, devido à saída de água dos vazios do solo;
- c) nos estudos de estabilidade, pertinente às análises de tensão efetiva, governando a resistência do solo, que depende da pressão neutra, que por sua vez é dependente das tensões originadas da percolação.

### 2.1.1 Conservação de energia

Como já foi exposto, o solo é um meio particulado com a capacidade de permitir a percolação de água. Por isso, a equação de Bernoulli pode ser aplicada ao fenômeno de migração da água em solos (CRAIG, 2011).

Pela equação é possível determinar a carga total em um ponto na massa de água que percola no interior do solo. A formulação de Bernoulli é apresentada a seguir:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + Z \quad (2)$$

Em que:

h = carga total;

u = pressão;

v = velocidade;

g = aceleração da gravidade;

$\gamma_w$  = peso específico da água.

A primeira parcela da fórmula de Bernoulli representa a carga piezométrica em determinado ponto sobre o peso específico da água e Z é a distância vertical com relação a um nível de referência (DAS; SIVAKUGAN, 2015). Devido à baixa velocidade de percolação presente no solo, a carga cinética é praticamente nula, sendo desprezada, de forma que a equação de Bernoulli para solos fica definido como:

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

### 2.1.2 Lei de Darcy

De acordo com Massad (2016) foi por meio de uma experiência simples que Darcy descobriu, em 1850, que a vazão de água (Q) percolada através de uma areia é proporcional ao gradiente hidráulico (i) e à área da seção transversal do permeâmetro (A).

Das e Sivakugan (2015) afirmam que o fluxo de água na experimentação de Darcy, com o emprego de um permeâmetro, baseou-se principalmente com o uso de areias puras, mas é extensível a uma grande variedade de solos e aplicáveis em condições de fluxo laminar.

A equação de Darcy é apresentada abaixo:

$$Q = k \frac{h}{l} A \quad (4)$$

Onde:

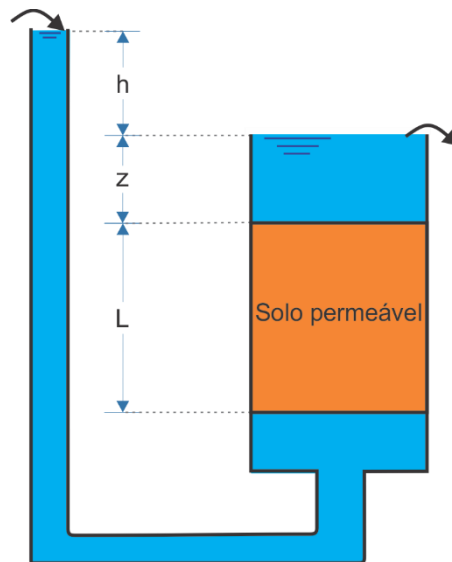
Q = vazão;

A = área do permeâmetro;

k = constante para cada tipo de solo.

A Figura 2 demonstra um esquema do experimento de Darcy para elaboração de sua equação:

Figura 2 – Esquema de percolação de água em um permeâmetro



Fonte: Pinto (2006).

Na equação 4, a relação  $h/l$  é chamada de gradiente hidráulico, onde pode ser expressa pela letra  $i$ ,  $h$  é a perda de carga no momento da percolação da água e  $L$  é o comprimento do corpo de prova. Desta forma, a equação de Darcy é apresentada da seguinte forma:

$$Q = kiA \quad (5)$$

Por meio da equação de Darcy, também é possível encontrar a velocidade pela qual a água passa pela areia do permeâmetro, dividindo-se a equação anterior pela área (PINTO, 2006). Assim, uma determinada parcela de água flui por unidade de tempo pela área de seção transversal bruta do material é possível é denominada velocidade de percolação, tomando a Lei de Darcy outra configuração:

$$v = ki \quad (6)$$

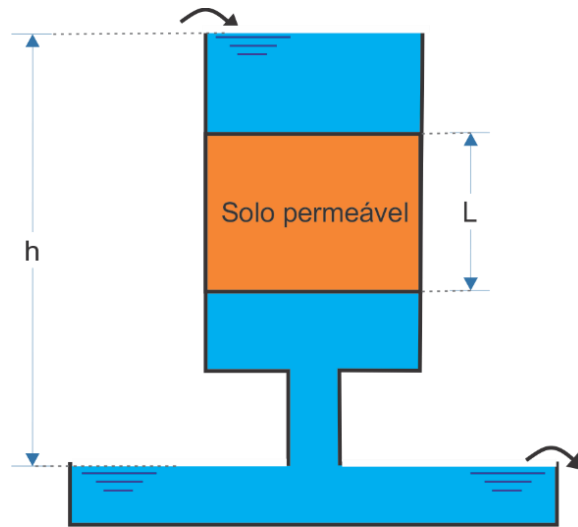
## 2.2 Ensaio de permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade permitem encontrar o coeficiente de percolação de um determinado tipo de solo que se deseja analisar. Há dois ensaios laboratoriais, são eles o ensaio de carga constante, que é regido pela NBR 13292/1995 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante, além do ensaio de carga variável, que é regulamentado pela NBR 14545/2000 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. A seguir será apresentado a descrição de cada ensaio.

### a) Ensaio de permeabilidade de carga constante

O ensaio de carga constante é aplicado a solos granulares baseando-se nos experimentos de Darcy. A Figura 3 ilustra a aparelhagem necessária para o ensaio.

Figura 3 – Ensaio permeâmetro de carga direta



Fonte: Pinto (2006).

Conforme Pinto (2006), se conservada a altura  $h$  e o fluxo de água constante, esta é percolada no solo granular e colhida, então é medido seu volume. Sabendo-se da vazão e das características geométricas do permeâmetro, o parâmetro  $k$  (coeficiente de permeabilidade) é obtido de modo direto pela Lei de Darcy.

Assim, a equação para cálculo do coeficiente de permeabilidade é dada por:

$$k = \frac{Q}{iA} \quad (7)$$

Onde:

$Q$  = vazão;

$A$  = área do permeâmetro;

$k$  = coeficiente de permeabilidade;

$i = h/L$  = gradiente hidráulico.

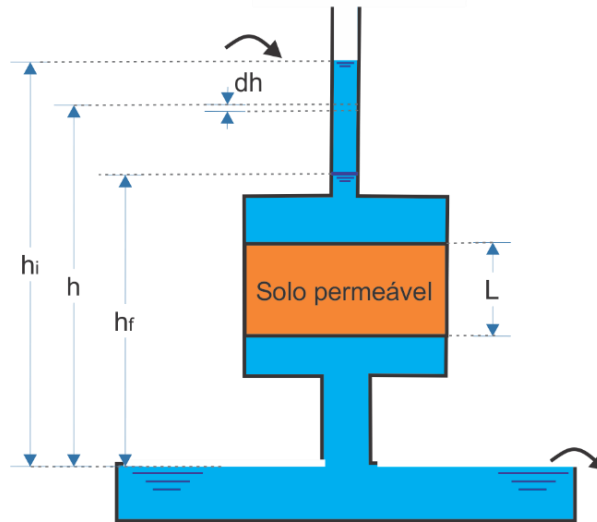
b) Ensaio de permeabilidade de carga variável

Em situações em que o solo analisado é pouco permeável, como é o caso das argilas, o ensaio com permeâmetro de carga variável é o mais indicado em virtude de sua maior precisão (PINTO, 2006). De acordo com Massad (2016), esse tipo de ensaio é aplicável a solos saturados, com coeficientes de permeabilidade que satisfaçam as seguintes condições de  $10^{-6}$

cm/s  $\geq k \geq 10^{-10}$  cm/s e de acordo com a norma NBR 14545/2000, esse ensaio é indicado somente para argilas, com  $k < 10^{-3}$  cm/s.

A Figura 4 demonstra a composição do ensaio de carga variável.

Figura 4 – Ensaio permeâmetro de carga variável



Fonte: Pinto (2006).

Das e Sivakugan (2015) desenvolveram o respectivo ensaio, a água do piezômetro flui pela amostra de solo.  $H_i$  é a diferença de inicial no tempo  $t = 0$ . Após, a água flui através da amostra de maneira que  $h_f$  é a diferença de carga total no tempo  $t = t_2$ . De modo que a vazão na amostra de solo em qualquer instante  $t$  pode ser dada pela Equação 8:

$$Q = k \frac{h}{l} A = -a \frac{dh}{dt} \quad (8)$$

Onde:

$Q$  = vazão;

$a$  = área da seção transversal do piezômetro;

$A$  = área da seção transversal da amostra de solo.

Reformulando a Equação 8, tem-se:

$$dt = \frac{aL}{Ak} \left( -\frac{dh}{h} \right) \quad (9)$$



Integrando entre os limites de 0 a t no primeiro lado da equação e no lado seguinte integrando entre os limites da diferença de carga inicial  $h_i$  e carga final  $h_f$ , a Equação 9 assume outra forma:

$$t = \frac{aL}{Ak} \log_e \frac{h_i}{h_f} \quad (10)$$

Finalmente, o coeficiente de permeabilidade para solos argilosos obtido em laboratório é dado pela Equação 11:

$$k = 2,303 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_i}{h_f} \quad (11)$$

### 2.3 Fatores de influência na permeabilidade dos solos

Taylor (1948) determinou uma equação para o coeficiente de permeabilidade, assimilando o fluxo de água pelo solo a um conjunto de tubos capilares, correlacionando a Lei de Darcy. A equação formulada por Taylor é apresentada a seguir:

$$k = D^2 \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} C \quad (12)$$

Onde:

D = diâmetro de uma esfera equivalente ao tamanho dos grãos do solo;

$\gamma_w$  = peso específico do fluido;

$\mu$  = viscosidade do líquido;

C = coeficiente de forma;

e = índice de vazios.

Pela equação de Taylor (1948), é possível observar a existência de vários fatores que influenciam na determinação do coeficiente de permeabilidade, como a estrutura das partículas de solo e o estado do líquido que o percola.

Assim, conforme Taylor (1948), a permeabilidade de um dado solo depende do quadrado de uma dimensão significativo do tamanho médio dos grãos, representado pelo termo  $D^2$ , designando o quadrado do diâmetro da esfera de relação volume-área equivalente.

Ainda, depende das propriedades do fluido que passam pelos poros do solo, como mostrado pelo termo  $\frac{\gamma_w}{\mu}$  e do índice de vazios, em que o fator C também pode depender um pouco deste índice de vazios e, portanto, pode ter que ser incluído nas considerações de taxa de vazios, portanto,  $\frac{e^3}{1+e} C$  representa o efeito do índice de vazios do solo em sua permeabilidade.

A permeabilidade de um solo também depende das formas e arranjos de seus poros, ou de sua estrutura, que é representado pelo fator de forma C e da quantidade de gás não dissolvido na água dos poros. Nos termos da equação são notados os fatores que afetam a permeabilidade e o fator final é conhecido pela experiência, não sendo deduzido por meio de considerações teóricas (TAYLOR, 1948).

Portanto, pela equação, o coeficiente de permeabilidade é dependente do quadrado do diâmetro dos grãos de solo, portanto, provendo suporte à equação de Hazen (1930), que é uma equação empírica que correlaciona o coeficiente de permeabilidade e o diâmetro efetivo do solo (PINTO, 2006). Esta equação será mais bem discutida em um tópico específico posteriormente.

Ainda, pela equação de Taylor (1948), é possível observar a existência de vários fatores que influenciam na determinação do coeficiente de permeabilidade, como a estrutura das partículas de solo e o estado do líquido que o percola.

### ***2.3.1 Influência do estado do solo e tamanho dos grãos***

Como dito anteriormente, o coeficiente de permeabilidade de solos granulares é influenciado diretamente pelo índice de vazios e pelo quadrado do diâmetro efetivo das partículas. Além disso, o índice de vazios é função de diversos fatores, a princípio pode-se citar a forma pela qual o solo é originado, o que pode levar a arranjos mais densos ou mais fofos e, indiretamente, da sua distribuição granulométrica e do formato dos seus grãos. Ademais, uma pequena fração de finos permite uma reorganização das partículas, de forma que elas ficam mais próximas umas das outras, com redução dos vazios, diminuindo a permeabilidade (MASSAD, 2016).

Massad (2016) aborda ainda que em solos granulares, o coeficiente de permeabilidade apresenta-se pouco sensível a variações do coeficiente de uniformidade. Desta maneira, o tamanho dos grãos, exercendo uma influência indireta por meio do índice de vazios, tem influência muito maior para o parâmetro  $k$  quando comparado ao formato da curva granulométrica.

Pinto (2006) afirma que a equação de Taylor correlaciona o coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios do solo e quanto maior for sua porosidade, mais permeável ele é. Desta maneira, é possível calcular, através de uma equação de proporcionalidade, o coeficiente de permeabilidade de um solo, desde que conhecidos  $k$  e  $e$  (índice de vazios) de um solo de referência, assim como o índice de vazios do solo que se queira descobrir seu coeficiente de permeabilidade.

A equação de proporcionalidade é apresentada a seguir:

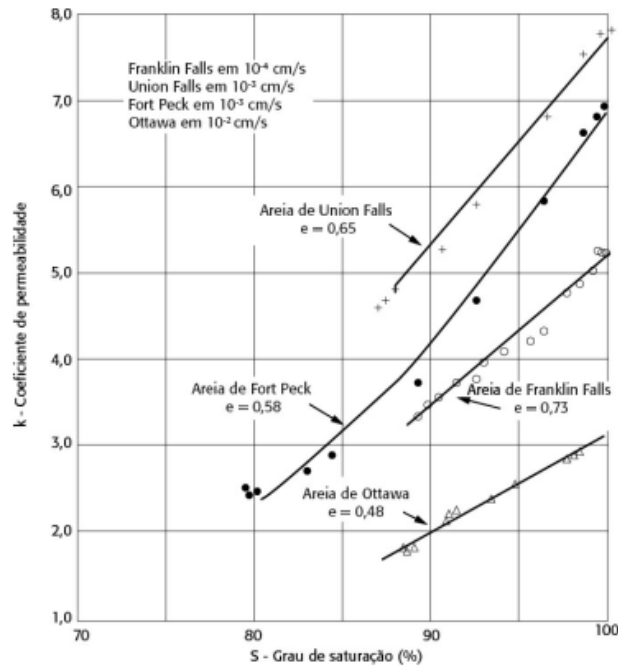
$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\frac{e_1^3}{(1 + e_1)}}{\frac{e_2^3}{(1 + e_2)}} \quad (13)$$

Esta formulação é apropriada para areias. Para argilas, a melhor solução é usar a correlação entre o índice de vazios e o logaritmo do coeficiente de permeabilidade (PINTO, 2006).

### 2.3.2 *Influência do grau de saturação do solo*

O coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado é menor que de um solo totalmente saturado, isto se deve à percolação da água que não remove todo o ar presente em um solo não saturado, permanecendo bolhas de ar contidas pela tensão superficial, constituindo obstáculos ao fluxo de água (PINTO, 2006).

Massad (2016), por sua vez, explica que o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) é maior, quanto maior for o grau de saturação ( $S$ ) do solo, chegando a triplicar os valores quando o grau de saturação passa de 80% para 100%. A Figura 5 esclarece a variação de  $k$  com  $S$ .

Figura 5 – Variação  $k$  x  $S$ 

Fonte: Massad (2016).

### 2.3.3 Influência do arranjo estrutural das partículas

A permeabilidade não é função somente do índice de vazios, mas também tem relação com a disposição relativa dos grãos. Tomando como exemplo os solos residuais, este tipo de solo apresenta coeficientes de permeabilidade maiores devido aos macroporos em sua estrutura, fator de grande importância também em solos compactados (PINTO, 2006).

Ainda, permeabilidade em solos com arranjo estrutural disperso, ou seja, com alto grau de orientação das partículas, em direção perpendicular à da orientação das partículas, é cerca de 1/3 da permeabilidade na direção paralela à disposição destas (MASSAD, 2016).

Massad (2016) também aponta que a influência do arranjo em que um solo se encontra é um dos fatores mais importantes a serem considerados nos estudos de condutividade hidráulica. Exemplificando, argilas moldadas com mesma densidade seca, uma compactada por pisoteamento, no ramo úmido, podem apresentar estrutura dispersa e outra compactada estaticamente, no ramo seco, podem apresentar estruturas floculadas. E quando saturadas, ambas ficam com parâmetros de densidade seca e umidade ótima iguais, mas com diferentes arranjos estruturais em sua composição (MASSAD, 2016).

Assim, quando compactados mais secos, a estrutura do solo permanece com aspecto floclado, possuindo maior índice de vazios e conseqüentemente aumentando o coeficiente de

permeabilidade, o que permite maior fluxo de água quando comparado a solos compactados com maior teor de umidade, mesmo possuindo índices de vazão iguais.

De fato, essa disposição flocular na estrutura de um solo o torna mais permeável, não apresentando, em princípio, anisotropia, mas com coeficientes de permeabilidade de 10 a 10.000 vezes maiores que valores obtidos para estruturas dispersas. A razão disso é que em um arranjo disperso a tortuosidade é maior (MASSAD, 2016).

Frequentemente, a permeabilidade se apresenta como uma característica não isotrópica em relação aos solos. Por exemplo, solos sedimentares possuem maiores coeficientes de permeabilidade na direção horizontal quando comparados à direção vertical. Isto quer dizer que de fato as partículas possuem uma tendência natural de suas maiores dimensões se orientarem na horizontal, este comportamento pode ser observado pelo fato de que as diversas camadas dos solos sedimentares possuem valores de coeficientes de permeabilidade diferentes. O mesmo comportamento é encontrado em solos compactados (PINTO, 2006).

Pinto (2006) complementa que valores médios de permeabilidade na direção horizontal podem alcançar números até 15 vezes maiores que valores obtidos na vertical.

#### ***2.3.4 Influência da temperatura***

Como já comentado, pela equação de Taylor, o coeficiente de permeabilidade é afetado pela variação do peso específico e pela viscosidade do líquido, que são características que também se modificam com a temperatura. Tendo a viscosidade maiores alterações devido à oscilação de temperatura (PINTO, 2006).

Para se controlar os efeitos da temperatura nos ensaios de permeabilidade desenvolveu-se uma convenção em que o coeficiente de permeabilidade é mencionado sempre à temperatura de 20°C, desta forma, registra-se a temperatura a qual foi realizado o ensaio e em seguida calcula-se o coeficiente referente à temperatura de 20°C. A fórmula 14 apresenta esta transformação:

$$k_{20} = k \frac{\mu}{\mu_{20}} \quad (14)$$

### **2.3.5 *Influência do tipo de fluido***

Olsen (1962 *apud* MASSAD, 2016) ressalta que para solos argilosos, em função da polaridade do fluido, ocorre um fenômeno de contrafluxo em virtude de um efeito de eletrosmose, existindo nas proximidades das partículas um movimento da água em sentido contrário ao da percolação.

Além disso, o tipo de fluido promove interferências na estrutura da argila, dispersa ou floculada. É o chamado efeito de moldagem, que influencia amplamente no valor  $k$ . Diferenças de até 1:400 foram encontradas em corpos de prova preparados no mesmo índice de vazios, mas em fluidos diferentes. Ratificando essa conclusão, amostras de solos ensaiadas com diferentes tipos de fluidos apresentaram aproximadamente os mesmos resultados para valores de permeabilidade, pois a estrutura era a mesma (LAMBE; WHITMAN, 1969).

### **2.3.6 *Influência da composição mineralógica do solo***

Massad (2016) afirma que a composição mineralógica é de pouca relevância para as areias, a não ser quando estas contenham mica ou matéria orgânica. Para as argilas, a dependência é bastante acentuada, manifestada por meio da estrutura do solo.

Em amostras preparadas em laboratório mostram que a permeabilidade varia acentuadamente com a composição mineralógica (LAMBE *apud* MASSAD, 2016).

Assim citando, valores de permeabilidade para a caulinita podem ser mil vezes maior do que o da montmorilonita. Terzaghi, Peck e Mesri (1996) afirmam que essa relação pode chegar a duzentas mil vezes, que, para a illita, comparada com a montmorilonita, pode chegar a duzentas vezes.

Além da grande influência do tamanho das partículas, há também grande influência dos íons constituintes do solo. Assim, quanto maior a capacidade de transferência de cátions, maior o efeito dos íons trocáveis na permeabilidade. Desta forma, a relação entre as permeabilidades de um argilomineral montmorilonita com  $\text{Ca}^{2+}$  e outro com  $\text{Na}^+$  é de trezentas vezes para um índice de vazios igual a sete (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

## 2.4 Valores usuais de coeficientes de permeabilidade para tipos de solos diferentes

O coeficiente de permeabilidade é maior a medida em que os vazios do solo aumentam. Para solos sedimentares, como ordem de grandeza, os seguintes valores da Tabela 1 podem ser considerados (PINTO, 2006).

Tabela 1 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos sedimentares segundo Pinto (2006)

Tipos de solo	K (cm/s)
Argilas	$< 10^{-7}$
Siltes	$10^{-4} - 10^{-7}$
Areias argilosas	$10^{-5}$
Areias finas	$10^{-3}$
Areias médias	$10^{-2}$
Areias grossas	$10^{-1}$

Fonte: Pinto (2006).

Massad (2010) explica que o coeficiente de permeabilidade, parâmetro de medida da resistência ao fluxo de água, abrange uma faixa muito ampla de valores. Desta forma, associado à essa grande variabilidade, sua determinação experimental acaba tornando-se problemática, pois trata-se um parâmetro quase não mensurável, podendo, como em muitas ocasiões, ter conhecimento somente de sua ordem grandeza. A Tabela 2, a seguir, também mostra valores de ordem de grandeza para determinados tipos de solos.

Tabela 2 – Valores usuais de K segundo Massad (2006)

Tipos de solo	K (cm/s)
Granito Intacto	$10^{-8} - 10^{-10}$
Argilas	$10^{-8}$
Siltes	$10^{-4}$
Granito Fissurado	$10^{-4}$
Areias	$10^{-2}$
Pedregulhos	$10^2$

Fonte: Massad (2006).

Harr (1990) e Chiossi (2013) apresentam em sua literatura, respectivamente, outros valores, como mostram as Tabelas 3 e 4 abaixo.

Tabela 3 – Valores típicos de K segundo Harr (1990)

Tipos de solo	K (cm/s)
Argilas	$< 10^{-6}$
Silte	0,0005 - 0,00001
Areia siltosa	0,002 - 0,0001
Areia fina	0,05 - 0,001
Areia misturada	0,01 - 0,005
Areia limpa grossa	1,0 - 0,01
Pedregulhos	$> 1,0$

Fonte: Harr (1990).

Tabela 4 – Valores típicos de K segundo Chiossi (2013)

Tipos de solo	K (cm/s)
Argilas não alteradas	$10^{-9} - 10^{-7}$
Areias muito finas; siltes; mistura de areias, silte e argila; argilas estratificadas	$10^{-7} - 10^{-3}$
Areias limpas; misturas de areias limpas e pedregulho	0,001 - 1
Pedregulho limpo	1 - 100

Fonte: Chiossi (2013).

## 2.5 Modelos empíricos de condutividade hidráulica

O coeficiente de permeabilidade é uma das propriedades mais importantes nos estudos das ciências do solo. Esta característica tem sua significância para compreensão do que seria um material permeável ou impermeável na resolução de problemas de drenagem em engenharia (CEDERGREN, 1989). Por esta razão, é indispensável estimar o coeficiente de permeabilidade de forma correta, para que o profissional que vai usar os resultados dos modelos possa tomar decisões convictas na escolha dos materiais.

Além do modelo proposto por Darcy, há outras relações empíricas que correlacionam determinadas características dos solos com o coeficiente de permeabilidade. A citar, para solos granulares, Hazen (1930) propôs a seguinte equação para obtenção do coeficiente de permeabilidade:

$$k = cD_{10}^2 \quad (15)$$



Onde:

$k$  = coeficiente de permeabilidade, em cm/s;

$c$  = constante que varia de 1,0 a 1,5;

$D_{10}$  = diâmetro efetivo, em mm.

Hazen (1930) discute, ainda, que sua formulação é adequada apenas para coeficientes de uniformidade menores que 5 e diâmetro efetivo dos grãos de 0,10 a 3,00 mm.

Kozeny (1927) e Carman (1938) determinaram outro modelo para o coeficiente de permeabilidade, a equação é apresentada a seguir:

$$k = \frac{1}{C_s S_s^2 T^2} \frac{\gamma_w}{\eta} \frac{e^3}{1 + e} \quad (16)$$

Onde:

$C_s$  = fator de forma;

$S_s$  = área superficial específica por unidade de volume de partículas;

$T$  = tortuosidade dos canais de fluxo;

$\gamma_w$  = peso específico da água;

$\eta$  = viscosidade do permeante;

$e$  = índice de vazios.

A fórmula de Kozeny-Carman (1938) possui algumas limitações, a primeira delas é que não há relações eletroquímicas entre as partículas de solo e a água, indicando que o modelo não é indicado para argilas, embora funcione para sedimentos não plásticos. Segunda, a fórmula assume condições da Lei de Darcy, em que se assume um fluxo laminar e uma baixa velocidade da água dos poros, de tal forma que o termo de inércia na equação de energia de Bernoulli pode ser ignorado. Estas condições aplicam-se em lodos, areias e em cascalho (CARRIER, 2003).

A terceira, a fórmula assume que as partículas do solo são relativamente compactas, desta forma, não é apropriado para solos contendo partículas de mica, sendo outra razão que a fórmula não é indicada para argilas (CARRIER, 2003).

Quarta, distribuição de tamanho de partícula extrema: A fórmula não é apropriada se a distribuição de tamanho de partícula tiver um prolongamento plano na fração fina. Assim,  $D_0$  (menor grão) deve ser conhecido ou estimado. Por último, a fórmula não explica claramente a anisotropia. Em sua maioria, a permeabilidade horizontal é maior que a permeabilidade vertical. Esta foi usada em quase todas as medições feitas em laboratório para validar a fórmula e para estabelecer o valor de  $C_s$  (CARRIER, 2003).

Carrier (2003) fez um estudo comparativo entre os modelos propostos por Hazen e Kozeny-Carman, recomendando que este seja reformulado e adotado em problemas geotécnicos, abandonando a fórmula de Hazen, devido a maior precisão de seus resultados, tendo em vista também que o modelo de Kozeny-Carman leva em consideração mais parâmetros, como a distribuição inteira de tamanho das partículas, a forma da partícula e o índice de vazios do solo.

Carrier (2003) propôs modificações na equação de Kozeny-Carman. A  $20\text{ }^\circ\text{C}$   $\gamma_w/\eta$  para a água é aproximadamente  $9,93 \cdot 10^4$  (1/cm.s) e  $(C_s T^2)$  também é aproximadamente igual a 5. Substituindo os valores na equação anterior, fica:

$$k = 1,99 \cdot 10^4 \left( \frac{1}{S_s} \right)^2 \frac{e^3}{1+e} \quad (17)$$

Em que:

$$S_s = \left( \frac{SF}{D_{ef}} \right); 1/cm \quad (18)$$

$$D_{ef} = \frac{100\%}{\left( \frac{f_i}{D_{(méd)i}} \right)} \quad (19)$$

E:

$f_i$  = fração de partículas entre dois tamanhos de peneira, em porcentagem;

$D_{(méd)i}$  (cm) = média dos tamanhos das partículas entre duas peneiras =  $(D_{ai})^{0,5} \times (D_{bi})^{0,5}$ ,  $D_{ai}$  e  $D_{bi}$ , em cm;

SF = fator de forma.

Fair e Hatch (1933 *apud* CARRIER, 2003) apresenta valores para SF, tais que para grãos esféricos – 6,0; arredondados – 6,1; desgastados – 6,4; afiados – 7,4 e angulares – 7,7.

Assim, combinando as equações 17, 18 e 19:

$$k = 1,99 \cdot 10^4 \left[ \frac{100\%}{\sum \frac{f_i}{D_{ai}^{0,5} \times D_{bi}^{0,5}}} \right]^2 \left( \frac{1}{SF} \right)^2 \left( \frac{e^3}{1+e} \right) \quad (20)$$

Carrier (2003) ainda propôs mais uma modificação na fórmula de Kozeny e Carman, supondo que a distribuição do tamanho da partícula entre cada tamanho de peneiras fosse log-linear, demonstrando que  $1/D_{(méd)} = D_{ai}^{0,404} \times D_{bi}^{0,595}$ , assim:

$$k = 1,99 \cdot 10^4 \left[ \frac{100\%}{\sum \frac{f_i}{D_{ai}^{0,404} \times D_{bi}^{0,595}}} \right]^2 \left( \frac{1}{SF} \right)^2 \left( \frac{e^3}{1+e} \right) \quad (21)$$

Igualmente, Chapuis (2004) avaliou métodos para prever a condutividade hidráulica saturada de areias limpas e cascalho, discutindo vários fatores que afetam a imprecisão nas estimativas dos resultados de testes de laboratório, propondo seu modelo para o cálculo do coeficiente de permeabilidade por meio da seguinte equação:

$$k \left( \frac{cm}{s} \right) = 2,4622 [D_{10}^2 \left( \frac{e^3}{1+e} \right)]^{0,7825} \quad (22)$$

Sendo que  $D_{10}$  é o diâmetro efetivo em mm. Esta equação é válida para areias e pedregulhos naturais para previsão de  $k$  entre  $10^{-1}$  e  $10^{-3}$  cm/s, não sendo aplicada em casos de materiais triturados e solos siltosos com plasticidade (DAS; SIVAKUGAN, 2015).

A equação de Hazen foi comparada com a equação do *Naval Facilities Engineering Command* (NAVFAC). A capacidade preditiva das duas equações é avaliada usando dados laboratoriais publicados para amostras de areia e cascalho homogêneas, com um diâmetro efetivo entre 0,13 e 1,98 mm, com razão de vazios no intervalo de 0,4 e 1,5

(CHAPUIS, 2004). Assim, propôs em seu trabalho uma equação de melhor ajuste em um gráfico do logaritmo de  $k$  versus o logaritmo de  $D_{10}^2 e^3 / (1 + e)$ .

Com as curvas de distribuição das diferenças  $[(\log(k \text{ medido}) - \log(\text{predito } k))]$  foram obtidos valores médios de  $-0,07$ ,  $-0,21$  e  $0,00$  para o Hazen, NAVFAC e seu modelo, respectivamente, com desvios padrão de  $0,23$ ,  $0,36$  e  $0,10$ , respectivamente. Usando os valores dos diâmetros efetivos e dos índices de vazios, a nova equação prevê um valor  $k$  geralmente entre  $0,5$  e  $2,0$  vezes o valor  $k$  medido para os dados considerados (CHAPUIS, 2004).

## 2.6 Modelos estatísticos

Os conceitos e métodos estatísticos são indispensáveis na compreensão de inúmeros problemas que possam acontecer ao redor no mundo, fornecendo meios de obtenção de novas percepções no que diz respeito ao comportamento de diversos fenômenos. Estes métodos também propiciam aos engenheiros e cientistas a fazerem julgamentos e decisões inteligentes na presença de incertezas e variações. Diante destas instabilidades, haveria pouca necessidade de estatísticos ou modelos estatísticos, sendo uma única observação necessária para revelar todo o conhecimento desejado na interpretação de um fenômeno específico em estudo (DEVORE, 2014).

Diante disto, adicionam ainda Montgomery e Runger (2014), que os métodos estatísticos ajudam profissionais de várias áreas a entender a tamanha variabilidade dos diversos fenômenos em diversos campos do conhecimento. Assim, as técnicas estatísticas fornecem uma maneira útil para incorporar essa variabilidade em processos de tomadas de decisão.

Dentre essas técnicas, por exemplo, existem os modelos de regressão, que são poderosas ferramentas para o desenvolvimento de novos produtos e sistemas, aprimoramento e idealização de projetos, desenvolvimento e melhorias de processos de produção (MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

Montgomery e Runger (2014) pontuam também que modelos de regressão são técnicas estatísticas mais usadas entre cientistas e engenheiros na construção de modelos. Mas é preciso cautela no planejamento eficiente de experimentos, coleta de dados, análise e interpretação de resultados obtidos pelo método estatístico proposto para a solução de um problema em estudo.

O objetivo dos modelos lineares são identificar e estabelecer a relação entre variáveis explicativas e resposta. Os modelos de regressão lineares são definidos, de modo geral, como modelos empíricos. Modelos não-lineares são, em sua grande maioria, determinados pelo conhecimento do tipo de relação entre as variáveis. Em modelos de regressão múltipla, os dados observados de uma variável resposta são descritos por uma função de uma ou mais variáveis explicativas que é não linear aos seus parâmetros. Desta forma, o emprego dessas ferramentas estatísticas surge nas diversas áreas, em que são estabelecidas funções que possuem coeficientes, que são parâmetros identificados e estimados a partir de dados observados ou experimentais (ZEVIANI; JÚNIOR; BONAT, 2013).

### ***2.6.1 Regressão linear simples***

A conjunto de ferramentas estatísticas que são usadas para modelar e pesquisar relações entre variáveis que estão relacionadas de maneira não determinística é chamada de análise de regressão. No primeiro caso de regressão, há somente uma variável independente ou preditor  $x$  e a relação com a resposta  $Y$  é considerada linear (MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

Supondo que a verdadeira relação entre  $Y$  e  $x$  seja uma linha reta e que a observação  $Y$  em cada nível de  $x$  seja uma variável aleatória, o valor esperado de  $Y$  para cada valor de  $x$  é dado por:

$$E(Y|x) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (23)$$

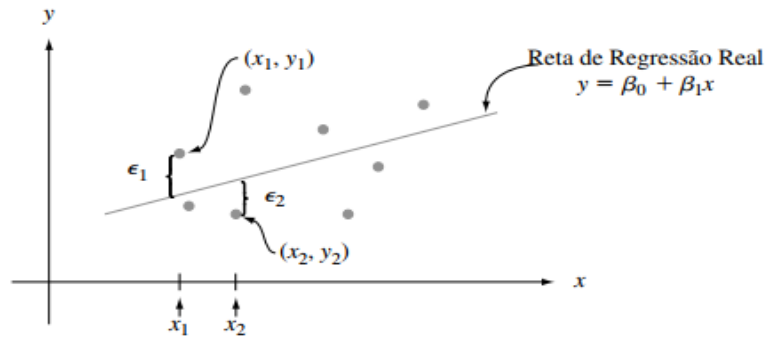
Sendo a interseção  $\beta_0$  e a inclinação  $\beta_1$  coeficientes desconhecidos da regressão. Mas, na maioria dos problemas reais, os valores da interseção e da inclinação ( $\beta_0$  e  $\beta_1$ ) e a variância do erro ( $\sigma^2$ ) não serão conhecidos, pois serão estimados a partir dos dados da amostra. Assim, este modelo ajustado de regressão é tipicamente usado na previsão de observações futuras de  $Y$  ou para estimar a resposta média em um nível particular de  $x$  (MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

Deste modo, considera-se que cada observação,  $Y$ , possa ser descrita pelo modelo a seguir:

$$E(Y|x) = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (24)$$

Em que  $\varepsilon$  é um erro aleatório com média zero e variância desconhecida  $\sigma^2$ . As estimativas de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  devem resultar em uma linha que seja o melhor ajuste para os dados. A Figura 6 mostra o desvio dos dados em relação ao modelo de regressão.

Figura 6 – Desvio dos dados em relação ao modelo de regressão



Fonte: Devore (2014).

O cientista Karl Gauss (1777 – 1855) estimou os parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$  de modo a minimizar a soma dos quadrados dos desvios verticais. O critério criado por ele para estimar esses coeficientes é chamado de método dos mínimos quadrados (MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

As equações para estimativa dos mínimos quadrados da interseção e da inclinação no modelo de regressão linear simples são apresentadas a seguir:

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (25)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad (26)$$

Em que  $\bar{y} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n y_i$  e  $\bar{x} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n x_i$

Ao calcular  $\hat{\beta}_0$ , é necessário o uso de números suplementares em  $\hat{\beta}_1$  porque, se a magnitude de  $x$  for grande, o arredondamento influenciará a resposta final. É importante enfatizar que, antes de  $\hat{\beta}_1$  e  $\hat{\beta}_0$  serem calculados, deve-se examinar um gráfico de dispersão para verificar se o modelo probabilístico linear é adequado. Se os pontos não tenderem a se agrupar ao redor de uma reta com aproximadamente o mesmo grau de dispersão para todo  $x$ , devem ser investigados outros modelos. Contudo, na prática, os gráficos e os cálculos de regressão normalmente são realizados por meio de softwares estatísticos (DEVORE, 2014).

### 2.6.2 Regressão não linear

O modelo estatístico é linear se a quantidade de interesse, geralmente a média de  $Y$ , é função linear dos parâmetros, caso contrário é não linear. As principais vantagens do modelo não linear em relação ao modelo linear é que sua escolha está associada à conhecimento prévio sobre a relação a ser modelada e geralmente apresenta interpretação prática para os parâmetros (ZEVIANI; JÚNIOR; BONAT, 2013).

De maneira resumida, Zeviani, Júnior e Bonat (2013) apresentam mais vantagens do modelo não linear em comparação ao modelo linear, são eles: sua escolha tem sustentação baseada em teoria ou princípios mecanísticos (físicos, químicos ou biológicos) ou qualquer outra informação prévia, certos parâmetros são quantidade de interesse para o pesquisador providos de interpretação, podem ser feitas previsões fora do domínio observado de  $x$ , são parcimoniosos por apresentarem tipicamente menos parâmetros, partem do conhecimento do pesquisador sobre o fenômeno alvo.

Ainda, segundo Zeviani, Júnior e Bonat (2013), os modelos de regressão não lineares possuem algumas desvantagens, por exemplo, são modelos que requerem procedimentos iterativos de estimação baseados no fornecimento de valores iniciais para os parâmetros, os métodos de inferência são aproximados e exigem conhecimento do pesquisador sobre o fenômeno alvo.

Um modelo de regressão não linear pode ser descrito como na Equação 27.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x^k + \varepsilon \quad (27)$$

A variável dependente ou de resposta,  $Y$ , pode estar relacionada a  $k$  variáveis regressoras ou independentes. Os parâmetros  $\beta_j$ ,  $j = 0, 1, \dots, k$ , são chamados de coeficientes

de regressão. Esse modelo descreve um hiperplano no espaço k-dimensional das variáveis regressoras,  $x_j$ . O parâmetro  $\beta_j$  representa a variação esperada na resposta Y por unidade de variação unitária em  $x_j$ , quando todos os outros regressores restantes  $x_i$  ( $i \neq j$ ) forem mantidos constantes (MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

### 2.6.2.1 Aplicabilidade e verificação do modelo

Observar os pares de amostras em um gráfico  $(x_i, y_i)$  é o primeiro passo necessário para determinar a forma de uma relação matemática entre x e y. É possível ajustar aos dados várias funções diferentes, usando o princípio dos mínimos quadrados ou outro método de aderência. Uma vez que a aplicação da forma escolhida é ajustada ou aderida, é fundamental verificar a aderência do modelo para confirmar se é de fato apropriado para o entendimento do fenômeno em estudo (DEVORE, 2014).

Ainda, segundo Devore (2014), o tratamento mais eficaz de avaliar a adequação do modelo é calcular os valores  $\hat{y}_i$  ajustados, também chamados de valores previstos, e os resíduos  $e_i = y_i - \hat{y}_i$ . Em seguida, dispor graficamente várias funções dessas quantidades calculadas, para então examinar os gráficos para confirmar a opção de modelo ou para obter indicações de que o modelo não é apropriado. Suponha que o modelo de regressão linear simples seja correto e considere  $y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$  a equação da reta de regressão estimada. Portanto, o i-ésimo resíduo é  $e_i = y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i)$ . Para derivar propriedades dos resíduos, considere  $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ , o i-ésimo resíduo como uma variável aleatória (antes de as observações serem de fato feitas). Então:

$$E(Y_i - \hat{Y}_i) = E(Y_i) - E(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i) = 0 \quad (28)$$

Como  $\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i$  é uma função linear dos  $Y_j$ s,  $Y_i - \hat{Y}_i$  (os coeficientes dependem dos  $x_j$ s) também o é. Portanto, a normalidade dos  $Y_j$ s implica que cada resíduo é normalmente distribuído. Pode-se mostrar também que

$$V(Y_i - \hat{Y}_i) = \sigma^2 \cdot \left[ 1 - \frac{1}{n} - \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right] = 0 \quad (29)$$



Substituindo  $\sigma^2$  por  $s^2$  e extraíndo a raiz quadrada da equação anterior, obtemos o desvio padrão estimado de um resíduo. Seja padronizado agora cada resíduo subtraindo o valor médio (zero) e, em seguida, dividindo-o pelo desvio padrão estimado.

Os resíduos padronizados são dados por:

$$e_i^* = \frac{y_i - \hat{y}_i}{s \sqrt{1 - \frac{1}{n} - \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}}} ; i = 1, \dots, n \quad (30)$$

$$\text{Em que } S_{xx} = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}$$

Se, por exemplo, um determinado resíduo padronizado for 1,5, o resíduo em si será 1,5 desvio padrão (estimado) maior do que o que seria esperado da aderência do modelo correto e as variâncias dos resíduos diferem entre si. Entretanto, se  $n$  for relativamente grande, o termo entre colchetes  $\left[ 1 - \frac{1}{n} - \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right]$  na Equação 29 será próximo de 1, de forma que algumas fontes bibliográficas usam  $e_i/s$  como o resíduo padronizado. Os cálculos dos  $e_i^*$ s podem ser dispendiosos, por isso a importância do uso de softwares estatísticos que fornecem esses valores de maneira automática e podem elaborar vários gráficos compreendendo esses valores (DEVORE, 2014).

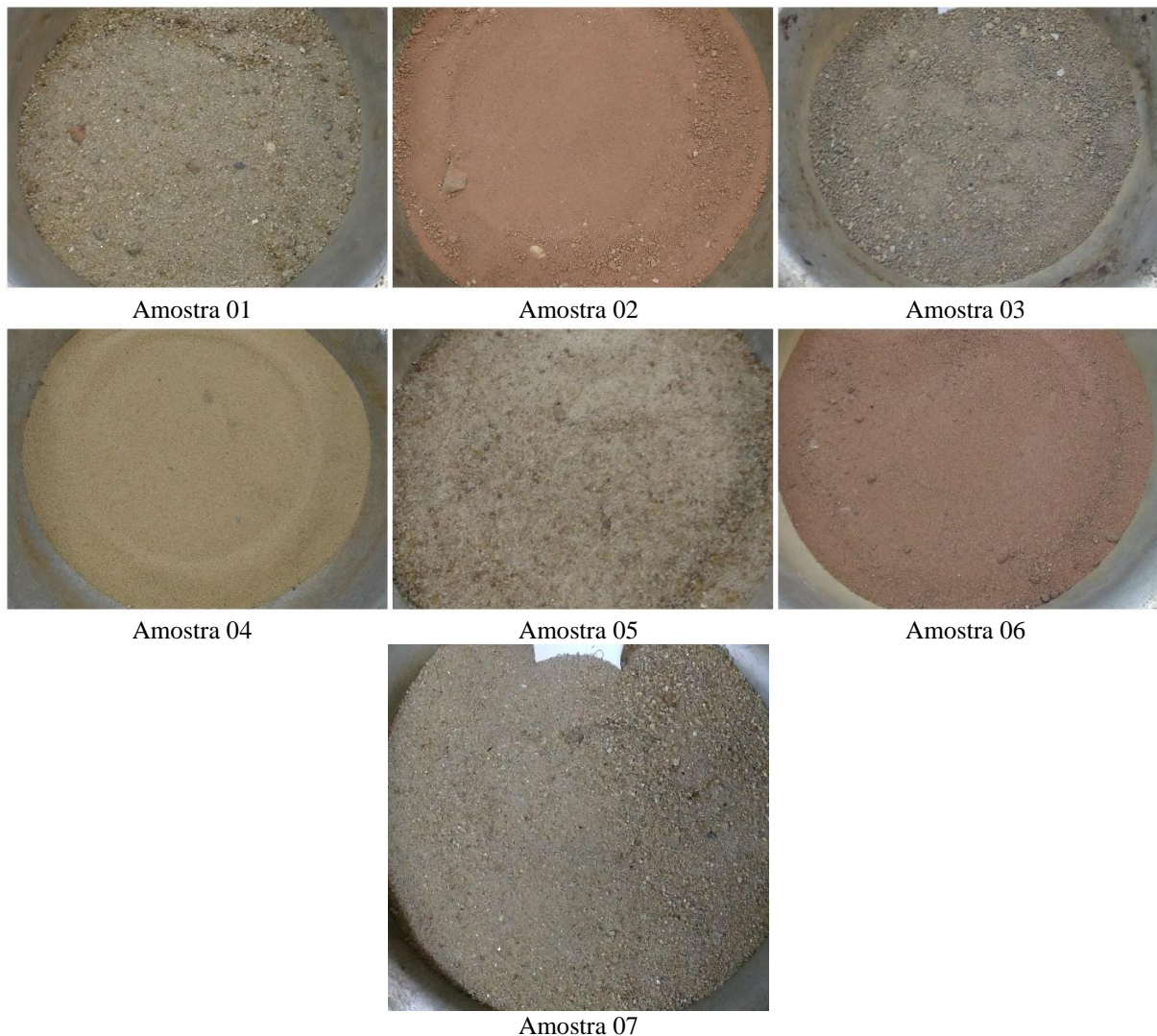
### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste tópico são definidos os procedimentos e experimentos necessários para o desenvolvimento das equações de permeabilidade em estudo. Foram adotados ensaios de laboratório, de modo que, através de seus resultados, sejam escolhidos os parâmetros necessários que tenham efetiva influência para o modelo. Serão apresentadas as características geotécnicas das amostras dos materiais coletados, os procedimentos de laboratório e as análises estatísticas realizadas e o processo de avaliação da equação elaborada.

#### **3.1 Descrição das amostras**

Este trabalho consiste em elaborar uma equação de permeabilidade para materiais arenosos. Tendo em vista este objetivo, foram coletadas 7 amostras de solos arenosos, algumas já disponíveis no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, situado na Universidade Federal do Ceará (UFC), e outras extraídas no Campus do Pici, na mesma universidade. As amostras estão ilustradas na Figura 7.

Figura 7 – Amostras coletadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Por análise tátil-visual, a amostra 01 trata-se de uma areia média e fina (areia de rio) de cor amarelada sem finos e com pouco pedregulho. A segunda é uma areia siltosa sem plasticidade de cor rosa. A terceira amostra é uma areia fina com poucos finos de cor cinza. A amostra de número 04 é definida como uma areia fina (areia de duna) de cor amarelada. A quinta amostra trata-se de uma areia média a grossa sem finos (areia de rio) de cor amarelada. A sexta é uma areia fina a média sem finos de cor marrom. E por último, a sétima amostra é uma areia fina a média sem pedregulhos de cor amarelada.

Para cada amostra supracitada estabeleceu-se a quantidade mínima de 6 quilogramas para a realização dos ensaios de densidade real, de índice de vazios máximo e mínimo, permeabilidade e edométrico.

### 3.2 Descrição dos ensaios

Para a caracterização dos materiais coletados foram feitos os ensaios de granulometria, densidade real, índice de vazios máximo e mínimo, adensamento edométrico e permeabilidade. Os procedimentos estão descritos nos itens a seguir.

#### 3.2.1 Granulometria

O ensaio de análise granulométrica de solos é regulamentado pela NBR 7181/2016 – SOLO – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA. O Ensaio tem como objetivo obter a curva de distribuição granulométrica, a partir de certas quantidades de material retido no jogo de peneiras, ajudando posteriormente na escolha dos parâmetros que serão usados na equação de permeabilidade. Foram ensaiadas todas as amostras disponíveis, com o intuito de na obtenção da curva granulométrica de cada material.

O conjunto de peneiras da NBR 7181/2016 usadas para o ensaio estão organizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Série de peneiras para o ensaio de granulometria

<b>PENEIRAS</b>		
	POLEGADAS	mm
	2"	50,8
	1 1/2"	38,1
	1"	25,4
<b>PENEIRAMENTO GROSSO</b>	3/4"	19,1
	1/2"	12,7
	3/8"	9,5
	Nº 4	4,76
	Nº 10	2
	Nº 30	0,60
	Nº 40	0,42
<b>PENEIRAMENTO FINO</b>	Nº 50	0,30
	Nº 100	0,15
	Nº 200	0,075

Fonte: NBR 7181/2016.

Primeiramente, conforme a norma NBR 6457/2016 – AMOSTRAS DE SOLO – PREPARAÇÃO PARA ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO E ENSAIOS DE

CARACTERIZAÇÃO, a amostra foi destorroada e passada em um repartidor. Após este passo, para solos arenosos, foi retirada outra amostra de 1kg para peneiramento.

Esta amostra foi passada na peneira de 2 mm, separando a fração fina da grossa. Após este procedimento, são separados 120 gramas do material passante para o procedimento de peneiramento fino. Este material foi passado nas peneiras de aberturas menores que 2mm, e em seguida pesado o material retido em cada uma delas. Antes do peneiramento, a amostra foi lavada na peneira de número 200 e colocado em estufa até constância de massa.

Assim como no peneiramento fino, a parte retida na peneira de 2 mm (material graúdo) foi lavada na peneira e colocada em estufa até constância de massa. Após, o material seco foi peneirado até a peneira de número 10 (2 mm), em seguida, foi obtida a massa retida em cada peneira.

A partir das massas das frações retidas em cada peneira foi possível obter uma curva granulométrica para cada amostra, em que o eixo vertical é a porcentagem das partículas menores do que os diâmetros considerados e o eixo horizontal os diâmetros das partículas em escala logarítmica.

### **3.2.2 *Densidade real***

Ainda como meio de investigação dos possíveis parâmetros para compor o modelo preditivo em estudo, foram realizados ensaios de densidade real nas amostras disponíveis.

O ensaio de densidade real de solos é regulamentado pela norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem DNER - ME 093/1994, apresentando os procedimentos, cálculos e aparelhagens necessárias.

Os principais equipamentos necessários são: peneira de número N° 10, estufa capaz de manter a temperatura entre 105 e 110 °C, balança, picnômetro com capacidade de 50 ml, termômetro e funil. Na Figura 8 tem-se as amostras no picnômetro.

Figura 8 – Picnômetros com amostra de solo



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O valor da densidade real é referido à temperatura de 20°C, por isso, em sua fórmula há a necessidade de um fator de correção ( $K_{20}$ ) referente à temperatura de ensaio, que no momento era de 28°C no laboratório.

Foram realizados três ensaios para cada amostra de solo, em que os resultados foram a média das determinações e não diferiram de 0,009.

A densidade real do solo é dada pela Equação 31.

$$D_{20} = k_{20} \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (31)$$

Onde:

$K_{20}$  = razão entre a densidade relativa da água à temperatura (t) e a densidade relativa da água a 20°C;

$D_{20}$  = Densidade real do solo à temperatura 20°C;

$P_1$  = Peso do picnômetro vazio;

$P_2$  = Peso do picnômetro mais amostra, em gramas;

$P_3$  = Peso do picnômetro mais amostra mais água, em gramas;

$P_4$  = Peso do picnômetro mais água, em gramas.

### 3.2.3 *Índice de vazios máximo e mínima*

O índice de vazios é um fator importante para determinação da permeabilidade de solos, foi necessário identificar esta propriedade para os ensaios subsequentes.

#### 3.2.3.1 *Determinação do índice de vazios máximo*

As diretrizes para este ensaio são dadas pela norma ABNT MB – 3324/1990 – SOLO – DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO DE SOLOS NÃO COESIVOS. Esta determina o índice de vazios máximo de solos granulares não coesivos contendo no máximo 12% em massa de material que passa na peneira de 0,075mm.

Os materiais para o ensaio consistem em estufa capaz de manter a temperatura entre 105 e 110°C, balança, bandeja metálica, concha metálica, pincel, escova de cerdas macias, funil, régua de aço biselada, cilindro de Proctor com volume 1000 cm<sup>3</sup>, tubo rígido de parede delgada, com volume da ordem de 1300 cm<sup>3</sup> e diâmetro interno de aproximadamente 7 cm.

A norma possui dois métodos de realização dos ensaios, por isso, foi escolhido o Método B. Como a própria norma orienta, este método é indicado quando não há material suficiente para realização do Método A.

Primeiramente, ao se utilizar o Método B, a massa necessária de material seco ( $w = 0\%$ ) foi de 2,5 kg. Com a amostra seca e homogeneizada, e o tubo de parede delgada dentro do molde, preencheu-se o tubo com a amostra até 1cm abaixo do topo, com o uso da concha e funil, com o devido cuidado, minimizando a segregação do material durante o preenchimento. A Figura 9 ilustra este procedimento.

Figura 9 – Preparação da amostra no molde



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Após o procedimento, extraiu-se o tubo, de modo a que o solo preenchesse por completo o molde. Em seguida, fez-se o arrasamento do excesso de solo e limpeza externa do cilindro. E pesou-se a amostra de solo que preencheu o molde. As Figura 10 e 11 representam os passos citados anteriormente.

Figura 10 – Procedimento para determinação do índice de vazios máximo



a) Extração do tubo de parede delgada.  
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

b) Arrasamento do excesso de solo.



Figura 11 – Procedimento para determinação do índice de vazios máximo



c) Cilindro após limpeza externa.

d) Amostra de solo que preencheu o molde.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O ensaio foi realizado com três valores de massa, reusando a amostra, mas com cuidado apropriado para não absorção de umidade.

Após estes procedimentos foi possível calcular a massa específica aparente seca da amostra, pela seguinte expressão:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_m} \quad (32)$$

Onde:

$\rho_s$  = massa específica aparente seca do solo, em g/cm<sup>3</sup>;

$M_s$  = massa do solo seco que preencheu o molde, em g;

$V_m$  = volume do molde, em cm<sup>3</sup>.

Considerou-se satisfatórios os valores da massa específica aparente seca obtidos que não diferiram da correspondente média mais que 2,5%. Denominou-se o valor médio da massa específica seca mínima ( $\rho_{\min}$ ), e em seguida calculou-se o índice de vazios máximo da amostra, de acordo com a seguinte fórmula:

$$e_{m\acute{a}x} = \frac{\rho_g}{\rho_{m\acute{i}n}} - 1 \quad (33)$$

Onde:

$e_{m\acute{a}x}$  = índice de vazios máximo do solo;

$\rho_g$  = massa específica dos grãos do solo, em g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_{m\acute{i}n}$  = massa específica aparente seca mínima do solo, em g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.3.2 Determinação do índice de vazios mínimo

As diretrizes para este ensaio são dadas pela norma ABNT MB – 3338/1991 – SOLO – DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS MÍNIMO DE SOLOS NÃO COESIVOS. Determina o índice de vazios mínimo de solos granulares não coesivos contendo no máximo 12% em massa de material que passa na peneira de 0,075mm.

Os principais materiais para o ensaio consistem em estufa cilindro de Proctor, com volume nominal de 1000cm<sup>3</sup> soldado à base, de modo que o conjunto resulte estanque, tuboguia, constituído por outro cilindro de Proctor solidário ao colarinho, disco-base da sobrecarga, perfurado e dotado de dispositivo para centralização da sobrecarga, mesa vibratória, do tipo utilizado para realizar o peneiramento de amostras na análise granulométrica.

A norma possui quatro métodos de realização dos ensaios, por isso, foi escolhido o Método B1. Como a própria norma orienta, este método é indicado quando não houver disponibilidade de mesa eletromagnética de vibração vertical.

A massa necessária de material seco e homogeneizado para este ensaio é de 2,5 kg. Primeiramente, fixou-se firmemente o colarinho ao molde e, com concha e funil, encheu-se parcialmente com a amostra de solo o conjunto molde e colarinho, de forma que, após submetido à vibração, houvesse um excesso de 1 a 2 cm acima do topo do molde. Em seguida, fixou-se o conjunto à mesa vibratória do tipo utilizado para realizar peneiramento. Ajustou-se a aparelhagem e vibrou-se o conjunto durante 10 minutos com frequência de vibração de 60Hz. A Figura 12 mostra o conjunto do ensaio B1.

Figura 12 – Conjunto ensaio do tipo B1



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Posteriormente, removeu-se o conjunto da mesa vibratória e rasando-se o excesso da amostra, limpando-se também o material que por ventura se depositou na base do molde ou aderido na sua superfície externa.

Por último, pesou-se a massa do molde preenchido com a amostra do solo. Repetiu-se os ensaios três vezes com reuso de material.

Assim como no item anterior, determinou-se a massa específica aparente seca da amostra, podendo-se calcular o índice de vazios mínimo da amostra de solo pela seguinte expressão:

$$e_{\text{mín}} = \frac{\rho_g}{\rho_{\text{máx}}} - 1 \quad (34)$$

Onde:

$e_{\text{mín}}$  = índice de vazios mínimo do solo;

$\rho_g$  = massa específica dos grãos do solo, em g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{máx}}$  = massa específica aparente seca máxima do solo, em g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.4 Adensamento edométrico

O ensaio de adensamento é amplamente usado para solos argilosos, em que o solo se encontra confinado em uma célula e é submetido a solicitações de compressão. Contudo, no presente estudo, usou-se todo o conjunto do ensaio em areias, de modo a obter uma correlação índice de vazios e permeabilidade, bem como fatores importantes que influenciam no modelo proposto e que podem ser incorporados à equação.

Foi seguida a norma ABNT MB – 3336/1991 – SOLO – ENSAIO DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL, mas com o conjunto adaptado com um aparato para a realização do ensaio de permeabilidade, que será mostrado em tópico posterior.

A aparelhagem principal para a elaboração do ensaio consiste no sistema de aplicação de carga, ou seja, a prensa de adensamento tipo Bishop com carregamento traseiro e célula de adensamento de 99,4 cm<sup>2</sup>, jogo de pesos, extensômetro e mesa de aço. As Figuras 13 e 14 ilustram o conjunto necessário ao ensaio.

Figura 13 – Prensa de adensamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 14 – Célula de adensamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O procedimento de ensaio consiste primeiramente na montagem do corpo de prova, por meio da massa específica aparente mínima do material, calculou-se o peso da amostra que preenche o volume do anel da célula de adensamento. Para montagem do corpo de prova, colocou-se o material com funil, de 1 a 2cm de distância do fundo de maneira a preservar o estado mais fofo da amostra. Em seguida, realizou-se o arrasamento até a altura de 2,5cm, que corresponde à altura do anel. Após, foi colocado papel filtro, para evitar o carreamento de material no ensaio de permeabilidade subsequente. Pesou-se a amostra do conjunto que posteriormente foi colocado na prensa de adensamento. As Figuras 15 e 16 mostram as etapas citadas.

Figura 15 – Etapas da montagem do corpo de prova



a) Colocação da amostra.

b) Arrasamento até topo do anel.

c) Ajuste da superfície.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).



Figura 16 - Etapas da montagem do corpo de prova



d) Detalhe da amostra na célula.  
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

e) Célula com papel filtro.

f) Conjunto completo.

Uma vez a amostra na célula de adensamento, anotou-se a leitura no tempo zero do extensômetro e em seguida a mostra foi submetida a uma carga de 1,25kg, anotando-se as leituras do extensômetro em 6s, 15s, 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 45min, 60min, ou até a estabilização da deformação no corpo de prova. Quando estabilizada, saturou-se a amostra por uma hora, anotando-se também a leitura do extensômetro para os intervalos ditos anteriormente. Após a saturação, o mesmo procedimento de leitura do extensômetro foi feito para incrementos de carga de 1,25kg, 2,5kg, 5,0kg, 10,0kg e 20kg.

Estes procedimentos foram realizados para todas as amostras, permitindo-se calcular o índice de vazios para cada estado de pressão, pela Equação 35.

$$e_f = e_0 - \frac{\Delta h}{h_0} (1 + e_0) \quad (35)$$

Onde:

$e_f$  = índice de vazios ao final do estágio de pressão;

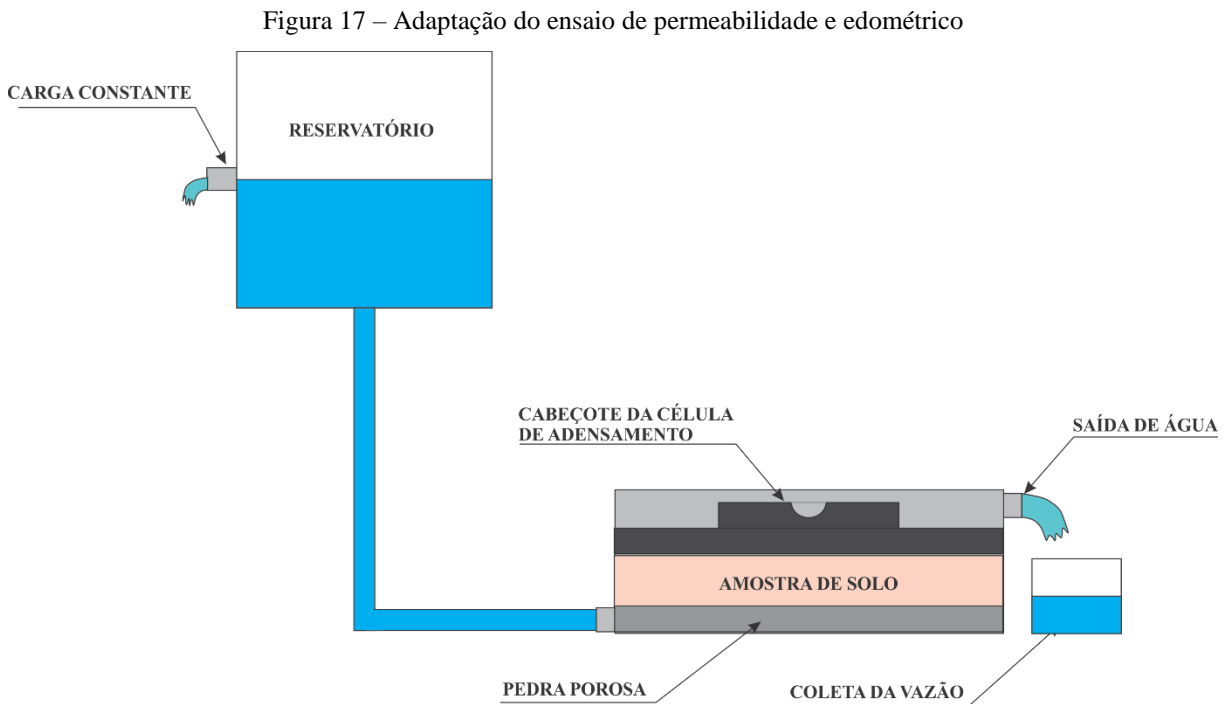
$e_0$  = índice de vazios no início do estágio de pressão;

$\Delta h$  = variação da altura do corpo de prova acumulada ao final do estágio de pressão;

$h_0$  = altura do corpo de prova no início do estágio de pressão.

### 3.2.5 Permeabilidade

Foi usado o ensaio de permeabilidade de carga constante para as amostras, que é normatizado pela NBR 13292/1995 – SOLO – DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE SOLOS GRANULARES À CARGA CONSTANTE. Este ensaio foi adaptado ao ensaio edométrico, possuindo assim a célula de adensamento uma saída de vazão de água, conforme demonstra a Figura 17.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Após cada término de carregamento, efetuava-se o ensaio de permeabilidade, permitindo o cálculo do coeficiente de permeabilidade de cada amostra a partir de diferentes índices de vazios e diferentes pressões.

A escolha desta metodologia deu-se devido a necessidade de se obter o maior número de dados possíveis, haja vista que a quantidade de material era reduzida para realização de diversos ensaios de caracterização. Outro fator para tal procedimento, é a possibilidade do maior controle geométrico da amostra, permitindo calcular com maior precisão os índices de vazios para cada estágio de carregamento, aspectos que não seriam possíveis em um ensaio de permeabilidade feito em um permeâmetro.

Primeiramente, com o fluxo de água ascendente e a carga hidráulica constante, mediu-se o volume de água durante três minutos, sendo este procedimento repetido por três

vezes para obtenção de um volume médio. Diante da vazão e das características geométricas da célula de adensamento, o coeficiente de permeabilidade é obtido pela Lei de Darcy.

Ainda, na Tabela 2 da norma NBR 13292 determina que o coeficiente de permeabilidade seja calculado referente à temperatura de 20°C, assim, os resultados foram multiplicados por coeficientes de ajuste à temperatura de ensaio de 25°C.

Dificuldades foram encontradas no decorrer dos ensaios, como o carreamento de partículas nas areias com maior teor de finos, problema que foi observado em duas amostras. Em uma delas a dificuldade em manter a estrutura da amostra foi resolvida com o uso de papel filtro. A outra amostra, durante o ensaio, mostrou-se com grande variação na estrutura, mesmo com uso do papel filtro, evidenciada pelo extensômetro e apresentando turbidez, sendo os dados de permeabilidade não aproveitados para a formulação do modelo em estudo. A Figura 18 mostra o carreamento de material em um dos ensaios de permeabilidade.

Figura 18 – Carreamento de material no ensaio de permeabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

### 3.3 Equação para estimativa do coeficiente de permeabilidade

Para a elaboração da equação de permeabilidade foram extraídos dos ensaios realizados os parâmetros julgados que poderiam influenciar diretamente na permeabilidade dos solos. A escolha dos parâmetros teve como base as metodologias já usadas em modelos de permeabilidade, tais como os trabalhos de Hazen (1930), Kozeny-Carman (1938), Carrier (2003) e Chapuis (2004), que envolviam parâmetros como índices de vazios, porosidade, densidade real e  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$ , a partir dos ensaios de granulometria.



Em uma primeira visão a equação possui a seguinte forma:

$$k = C (a_1 e^\alpha + a_2 n^\beta + a_3 \delta^\chi + a_4 D_{10}^\phi + a_5 D_{30}^\mu + a_n D_{60}^\omega)^\theta \quad (36)$$

Onde:

K = permeabilidade do solo, em cm/s;

C = constante;

a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>4</sub>, a<sub>5</sub>, a<sub>6</sub> = coeficientes;

α, β, χ, φ, μ, ω, θ = potências numéricas

e = índice de vazios do solo;

δ = densidade real dos grãos;

n = porosidade do solo;

D<sub>10</sub>, D<sub>30</sub>, D<sub>60</sub> = diâmetros dos grãos correspondentes à granulometria, em mm.

Para a análise estatística de regressão não linear dos dados foi usado o programa computacional *Microsoft Excel*®, mais especificamente sua ferramenta de otimização *Solver*®, possuindo um algoritmo chamado *Generalized Reduced Gradient (GRG2) nonlinear optimization code*.

Diante dos dados organizados em planilha, os parâmetro de influência para elaboração da equação foram e, n, δ, D<sub>10</sub>, D<sub>30</sub>, D<sub>60</sub>, em que foi-lhe designado um coeficiente e uma potência numérica, com valor inicial de 1,00 para ambos. Após, seguindo a Equação 36, foi calculado os valores de permeabilidade para todas as amostras.

Em seguida, pela própria planilha, foi estudado o erro médio entre os resultados dos ensaios de permeabilidade em laboratório e a permeabilidade da equação proposta, calculado pela Equação 37.

$$Erro_{m\u00e9dio} = \frac{\sum \frac{|(K_{predictivo} - K_{laborat\u00f3rio})|}{K_{laborat\u00f3rio}}}{\text{n\u00famero de ensaios}} \quad (37)$$

Em seguida, a ferramenta *Solver*® foi aplicada com o m\u00e9todo de otimiza\u00e7\u00e3o n\u00e3o linear, variando os coeficientes multiplicadores e as pot\u00eancias de cada par\u00e2metro de todo o conjunto de dados das amostras, de maneira que fosse obtido a menor m\u00e9dia poss\u00edvel dos erros.

De forma que este procedimento também fosse realizado várias vezes, configurando diversas situações de uso e não uso de determinados parâmetros, variando também seu chute inicial dos coeficientes.

Após a otimização realizada pelo *Solver*®, algumas propriedades tiveram seus coeficientes anulados, identificando-se os parâmetros sem correlação para o modelo em questão.

Por último, as amostras foram testadas em diferentes modelos empíricos de condutividade hidráulica, nos modelos de Hazen (1930), Kozeny-Carman (1938) e Chapuis (2004), permitindo uma comparação dos variados coeficientes de permeabilidade obtidos pelos parâmetros de um mesmo solo.

### **3.4 Método de validação do modelo preditivo**

O modelo preditivo em estudo tem como principal objetivo ser o mais preciso possível em relação aos ensaios de laboratório e deve ser testado para tal observação. Diante disto, para validação do modelo estudado foram realizados os ensaios descritos anteriormente em uma amostra de solo distinta das usadas para elaboração da equação.

Também foram feitos três ensaios de permeabilidade a carga constante da amostra de validação, com uso do permeâmetro, seguindo a NBR 13292/1995. Os experimentos foram realizados com a amostra em estado mais fofo, com solo mais compacto e um terceiro ensaio com o solo em estado de compactação intermediário entre os dois primeiros, verificando os resultados da equação proposta para diferentes índices de vazios.

Para o primeiro procedimento, em que a amostra se encontrava em seu estado mais fofo, o material foi colocado no permeâmetro, de maneira a preservar o índice de vazios máximo do solo até atingir a altura de 5,6cm. Após isto, deixou-se a amostra saturando por 30min, e em seguida foi realizado o ensaio de permeabilidade o medindo-se a vazão do permeâmetro por 2min 4 vezes, tirando-se a média dos valores.

O procedimento anterior foi realizado novamente por mais duas vezes, porém, com o solo em diferentes estágios de compactação, objetivando diminuir o índice de vazios e obter mais dados para validação da equação. Quando colocada no permeâmetro, a amostra foi compactada em três e duas camadas, atingindo as alturas de 5,0 e 5,2cm, em seus respectivos ensaios. A Figura 19 ilustra o procedimento de compactação da amostra no permeâmetro.

Figura 19 – Procedimento de compactação da amostra



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Em seguida, os parâmetros da amostra de validação foram aplicados na equação modelada e seus resultados de permeabilidade comparados aos ensaios de carga constante e a outras metodologias existentes na literatura, sendo o modelo de Hazen (1930), de Kozeny-Carman (1938) e de Chapuis (2004).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de laboratório e das análises estatísticas realizadas que resultaram em um modelo preditivo de permeabilidade para solos arenosos, segundo a metodologia descrita em capítulos anteriores. Serão discutidos ainda os resultados de permeabilidade encontrados pela determinação do modelo empírico, fazendo um comparativo com outras metodologias e os ensaios de laboratório. Por último, realiza-se uma análise de validação da equação modelada, aplicando-a parâmetros de amostra de solo e comparando os resultados com outras metodologias.

### 4.1 Resultado geral dos ensaios

Com os resultados dos ensaios desenvolvidos ao longo deste trabalho, especificamente os ensaios de granulometria, densidade real, permeabilidade, edométrico, índice de vazios máximo e mínimo, foram extraídos os parâmetros necessários para a elaboração da equação de permeabilidade. Os valores estão organizados na Tabela 6 e 7.

Tabela 6 – Resultado geral dos ensaios

AMOSTRA	k (cm/s)	$e$	$\delta$	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	n
AM1-13 KPa	3,02E-03	0,866	2,67	0,160	0,330	0,550	0,464
AM1-25 KPa	2,96E-03	0,853	2,67	0,160	0,330	0,550	0,460
AM1-50 KPa	2,96E-03	0,842	2,67	0,160	0,330	0,550	0,457
AM1-100 KPa	2,91E-03	0,826	2,67	0,160	0,330	0,550	0,452
AM1-200 KPa	2,83E-03	0,804	2,67	0,160	0,330	0,550	0,446
AM2-13 KPa	3,21E-04	0,888	2,70	0,075	0,160	0,250	0,470
AM2-25 KPa	1,82E-04	0,778	2,70	0,075	0,160	0,250	0,438
AM2-50 KPa	9,17E-05	0,716	2,70	0,075	0,160	0,250	0,417
AM2-100 KPa	4,63E-05	0,664	2,70	0,075	0,160	0,250	0,399
AM2-200 KPa	2,95E-05	0,622	2,70	0,075	0,160	0,250	0,383
AM4-25 KPa	2,58E-03	0,718	2,66	0,110	0,180	0,250	0,418
AM4-50 KPa	2,51E-03	0,695	2,66	0,110	0,180	0,250	0,410
AM4-100 KPa	2,41E-03	0,678	2,66	0,110	0,180	0,250	0,404
AM4-200 KPa	2,33E-03	0,661	2,66	0,110	0,180	0,250	0,398
AM5-13 KPa	2,79E-03	0,794	2,67	0,160	0,350	0,680	0,443
AM5-25 KPa	2,73E-03	0,783	2,67	0,160	0,350	0,680	0,439

Continua

AMOSTRA	k (cm/s)	$e$	$\delta$	D10	D30	D60	n
AM5-50 KPa	2,70E-03	0,777	2,67	0,160	0,350	0,680	0,437
AM5-100 KPa	2,65E-03	0,768	2,67	0,160	0,350	0,680	0,434
AM5-200 KPa	2,59E-03	0,753	2,67	0,160	0,350	0,680	0,430
AM7-13 KPa	2,68E-03	0,839	2,68	0,130	0,210	0,340	0,456
AM7-25 KPa	2,61E-03	0,829	2,68	0,130	0,210	0,340	0,453
AM7-50 KPa	2,58E-03	0,819	2,68	0,130	0,210	0,340	0,450
AM7-100 KPa	2,54E-03	0,805	2,68	0,130	0,210	0,340	0,446
AM7-200 KPa	2,51E-03	0,787	2,68	0,130	0,210	0,340	0,440

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de índice vazios máximos e mínimos de cada amostra de solo

AMOSTRA	$e_{\text{máx}}$	$e_{\text{mín}}$
AM1	0,869	0,654
AM2	0,869	0,654
AM3	0,869	0,654
AM4	0,869	0,654
AM5	0,875	0,677
AM6	0,875	0,677
AM7	0,875	0,677

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os resultados da amostra 06 não foram incorporados ao cálculo da equação em estudo, devido aos problemas de carreamento de material durante os ensaios de permeabilidade. Os dados da amostra 03 também não foram utilizados na elaboração da equação preditiva por se tratar de um solo fino, e, desta forma, não ser possível identificar o diâmetro  $D_{10}$ .

## 4.2 Modelo preditivo

Para a modelagem matemática na elaboração do modelo, seguindo a metodologia proposta anteriormente, a equação obtida para o cálculo da permeabilidade de solos arenosos apresenta a seguinte forma:

$$k = 1,76 * 10^{-4} (0,82n^{1,04} - 5,89D_{30}^{0,93} + 29,82D_{10}^{1,12})^{3,9} \quad (38)$$

Propriedades como densidade real, índice de vazios e  $D_{60}$  tiveram seus coeficientes multiplicadores nulos, excluindo-os do modelo empírico final. Por sua vez, o modelo relaciona o  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  e a porosidade do solo em que se deseja saber seu coeficiente de permeabilidade.

Ainda com um número de amostras reduzido, o erro médio mínimo conseguido pela otimização computacional foi de 33%, apontando valores da ordem de 0,4 a 3,5 maiores quando comparados aos experimentos. A Tabela 8 mostra o erro obtido pela equação preditiva e os ensaios de permeabilidade em laboratório:

Tabela 8 – Comparação dos resultados de permeabilidade entre ensaios de laboratório e o modelo obtido

AMOSTRA	Laboratório k (cm/s)	Modelo preditivo k (cm/s)	Ordem do Erro
AM1-13	3,02E-03	3,16E-03	1,0
AM1-25	2,96E-03	3,15E-03	1,1
AM1-50	2,96E-03	3,13E-03	1,1
AM1-100	2,91E-03	3,11E-03	1,1
AM1-200	2,83E-03	3,08E-03	1,1
AM2-13	3,21E-04	1,39E-04	0,4
AM2-25	1,82E-04	1,25E-04	0,7
AM2-50	9,17E-05	1,16E-04	1,3
AM2-100	4,63E-05	1,08E-04	2,3
AM2-200	2,95E-05	1,02E-04	3,5
AM4-25	2,58E-03	1,25E-03	0,5
AM4-50	2,51E-03	1,23E-03	0,5
AM4-100	2,41E-03	1,21E-03	0,5
AM4-200	2,33E-03	1,20E-03	0,5
AM5-13	2,79E-03	2,44E-03	0,9
AM5-25	2,73E-03	2,42E-03	0,9
AM5-50	2,70E-03	2,42E-03	0,9
AM5-100	2,65E-03	2,40E-03	0,9
AM5-200	2,59E-03	2,39E-03	0,9
AM7-13	2,68E-03	2,72E-03	1,0

Continua

AMOSTRA	Laboratório k (cm/s)	Modelo preditivo k (cm/s)	Ordem do Erro
AM7-25	2,61E-03	2,70E-03	1,0
AM7-50	2,58E-03	2,69E-03	1,0
AM7-100	2,54E-03	2,67E-03	1,1
AM7-200	2,51E-03	2,65E-03	1,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A partir dos resultados foi possível analisar a variação da permeabilidade entre os resultados de laboratório e a equação gerada. Observou-se que a maior variação do erro ocorreu com a amostra 04 e 02, podendo indicar a influência da fração de finos, uma vez que, por exemplo, a amostra 04 é uma areia fina e diâmetro máximo dos grãos de 0,4mm. As outras amostras apresentaram diâmetro máximo superior a 2mm e apresentaram erros menores, evidenciando que um solo com grande parte da sua fração de finos tem influência direta muito maior nos resultados da equação de permeabilidade quando comparados a solos de composição granulométrica mais grossa.

### 4.3 Comparação com outras metodologias

Com a finalidade de comparar a equação desenvolvida com as diferentes equações de permeabilidade existentes na literatura, como Hazen (1930), Kozeny-Carman (1938) e Chapuis (2004), os parâmetros das amostras iniciais foram aplicados nestas metodologias e seus resultados de permeabilidade foram comparados em relação aos resultados de obtidos em laboratório e à equação proposta.

Primeiramente, o modelo de Hazen (1930), usando-se os valores de  $D_{10}$  de cada amostra e constante  $c=1$ , mostrou-se um método com erros muito maiores em relação aos ensaios de laboratório, apresentado erros da ordem de 5 a 191 vezes maiores que os experimentos. Supõe-se que este erro se deve ao fato de que a formulação de Hazen foi proposta para grãos entre  $0,01\text{cm} < D_{10} < 0,3\text{cm}$ , mas ainda assim, apresentou erros muito elevados quando atendia às suas limitações. Os resultados de permeabilidade e seus respectivos erros em relação aos ensaios de laboratório estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparação do erro entre Hazen e o modelo proposto em relação aos ensaios de laboratório

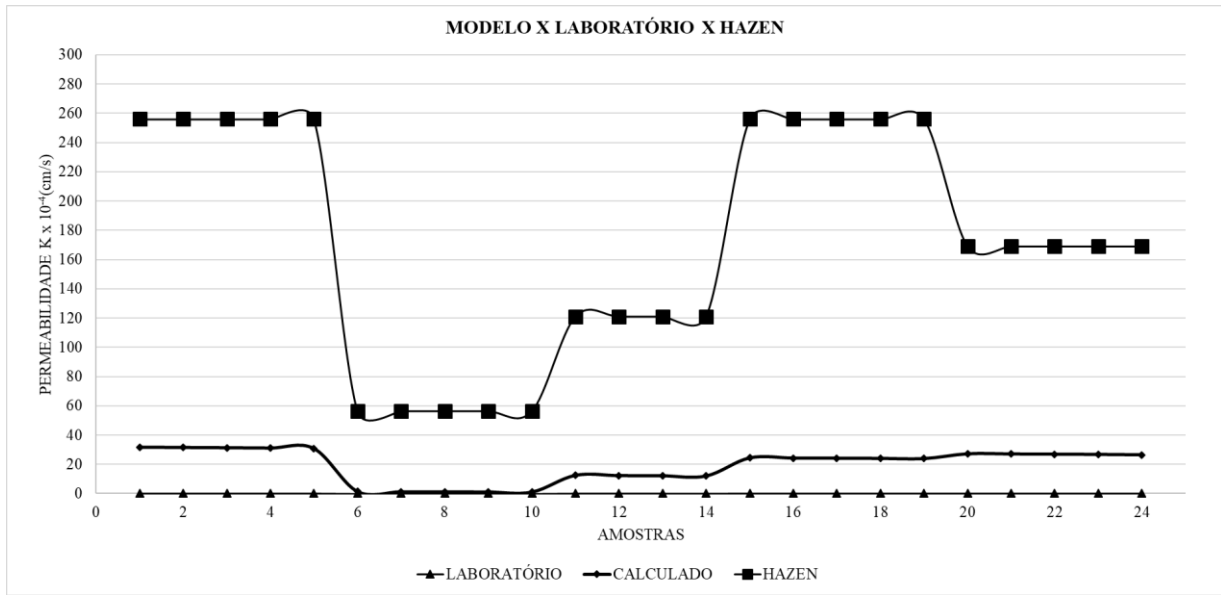
AMOSTRA	Laboratório k (cm/s)	Modelo preditivo k (cm/s)	Ordem do Erro do Modelo Preditivo	Hazen k (cm/s)	Ordem do Erro de Hazen
AM1-13	3,02E-03	3,16E-03	1,0	2,56E-02	8,5
AM1-25	2,96E-03	3,15E-03	1,1	2,56E-02	8,6
AM1-50	2,96E-03	3,13E-03	1,1	2,56E-02	8,6
AM1-100	2,91E-03	3,11E-03	1,1	2,56E-02	8,8
AM1-200	2,83E-03	3,08E-03	1,1	2,56E-02	9,0
AM2-13	3,21E-04	1,39E-04	0,4	5,63E-03	17,5
AM2-25	1,82E-04	1,25E-04	0,7	5,63E-03	30,9
AM2-50	9,17E-05	1,16E-04	1,3	5,63E-03	61,3
AM2-100	4,63E-05	1,08E-04	2,3	5,63E-03	121,5
AM2-200	2,95E-05	1,02E-04	3,5	5,63E-03	190,7
AM4-25	2,58E-03	1,25E-03	0,5	1,21E-02	4,7
AM4-50	2,51E-03	1,23E-03	0,5	1,21E-02	4,8
AM4-100	2,41E-03	1,21E-03	0,5	1,21E-02	5,0
AM4-200	2,33E-03	1,20E-03	0,5	1,21E-02	5,2
AM5-13	2,79E-03	2,44E-03	0,9	2,56E-02	9,2
AM5-25	2,73E-03	2,42E-03	0,9	2,56E-02	9,4
AM5-50	2,70E-03	2,42E-03	0,9	2,56E-02	9,5
AM5-100	2,65E-03	2,40E-03	0,9	2,56E-02	9,7
AM5-200	2,59E-03	2,39E-03	0,9	2,56E-02	9,9
AM7-13	2,68E-03	2,72E-03	1,0	1,69E-02	6,3
AM7-25	2,61E-03	2,70E-03	1,0	1,69E-02	6,5
AM7-50	2,58E-03	2,69E-03	1,0	1,69E-02	6,6
AM7-100	2,54E-03	2,67E-03	1,1	1,69E-02	6,7
AM7-200	2,51E-03	2,65E-03	1,1	1,69E-02	6,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Através do Gráfico 1 é possível visualizar melhor os resultados obtidos pela fórmula de Hazen.



Gráfico 1 – Comparativo dos valores de permeabilidade entre Hazen x Laboratório x Modelo proposto



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O modelo de Chapuis (2004) também apresentou erros de grande expressão em relação aos ensaios de laboratório, maiores até que o método de Hazen, da ordem de 9 a 326 vezes os valores obtidos nos experimentos. As amostras que não atendiam às limitações propostas pelo modelo apresentaram erro mínimo da ordem de 750%, enquanto que amostras que algumas amostras que respeitavam as limitações do modelo obtiveram erros ainda maiores.

A equação de Chapuis (2004) é uma equação válida para areias e pedregulhos naturais para previsão de  $k$  entre  $10^{-1}$  e  $10^{-3}$  cm/s, não sendo aplicada em casos de materiais triturados e solos siltosos com plasticidade. Os resultados do coeficiente de permeabilidade obtidos por Chapuis (2004) a partir das amostras e seu comparativo em relação aos resultados de laboratório estão organizados na Tabela 10 e no Gráfico 2.

Tabela 10 – Comparação do erro entre Chapuis e o modelo proposto em relação aos ensaios de laboratório

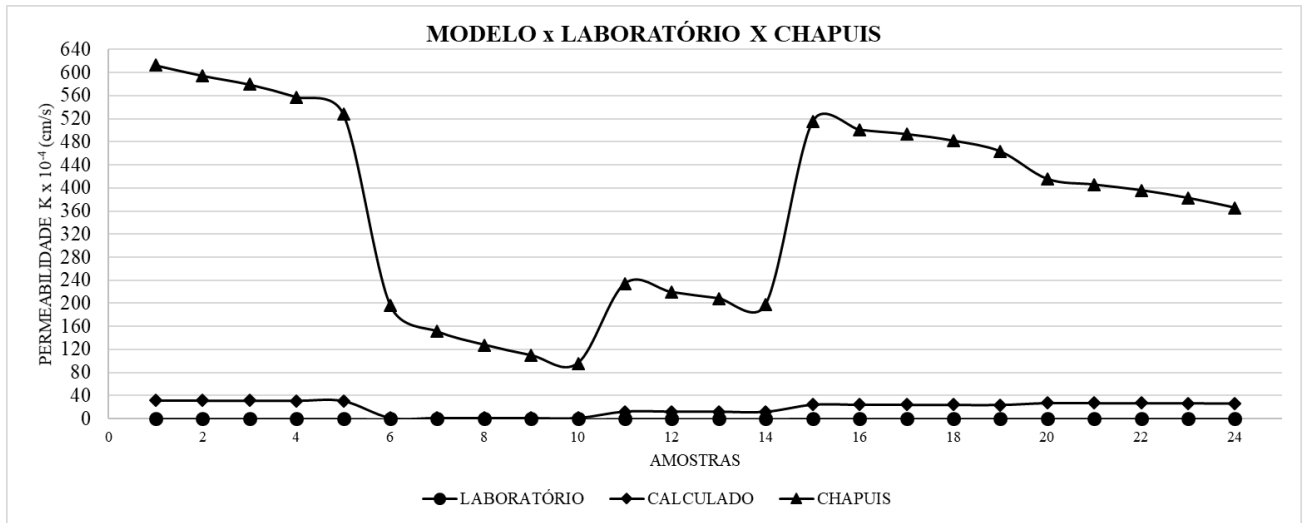
AMOSTRA	Laboratório k (cm/s)	Modelo preditivo k (cm/s)	Ordem do Erro do Modelo Preditivo	Chapuis k (cm/s)	Ordem do Erro de Chapuis
AM1-13	3,02E-03	3,16E-03	1,0	6,12E-02	20,3
AM1-25	2,96E-03	3,15E-03	1,1	5,94E-02	20,1
AM1-50	2,96E-03	3,13E-03	1,1	5,79E-02	19,6
AM1-100	2,91E-03	3,11E-03	1,1	5,58E-02	19,2
AM1-200	2,83E-03	3,08E-03	1,1	5,28E-02	18,7

Continua

AMOSTRA	Laboratório k (cm/s)	Modelo preditivo k (cm/s)	Ordem do Erro do Modelo Preditivo	Chapuis k (cm/s)	Ordem do Erro de Chapuis
AM2-13	3,21E-04	1,39E-04	0,4	1,97E-02	61,3
AM2-25	1,82E-04	1,25E-04	0,7	1,51E-02	83,0
AM2-50	9,17E-05	1,16E-04	1,3	1,28E-02	139,4
AM2-100	4,63E-05	1,08E-04	2,3	1,10E-02	237,0
AM2-200	2,95E-05	1,02E-04	3,5	9,60E-03	325,5
AM4-25	2,58E-03	1,25E-03	0,5	2,34E-02	9,1
AM4-50	2,51E-03	1,23E-03	0,5	2,19E-02	8,7
AM4-100	2,41E-03	1,21E-03	0,5	2,08E-02	8,6
AM4-200	2,33E-03	1,20E-03	0,5	1,98E-02	8,5
AM5-13	2,79E-03	2,44E-03	0,9	5,15E-02	18,5
AM5-25	2,73E-03	2,42E-03	0,9	5,01E-02	18,4
AM5-50	2,70E-03	2,42E-03	0,9	4,93E-02	18,3
AM5-100	2,65E-03	2,40E-03	0,9	4,82E-02	18,2
AM5-200	2,59E-03	2,39E-03	0,9	4,63E-02	17,9
AM7-13	2,68E-03	2,72E-03	1,0	4,16E-02	15,5
AM7-25	2,61E-03	2,70E-03	1,0	4,06E-02	15,5
AM7-50	2,58E-03	2,69E-03	1,0	3,96E-02	15,4
AM7-100	2,54E-03	2,67E-03	1,1	3,83E-02	15,1
AM7-200	2,51E-03	2,65E-03	1,1	3,66E-02	14,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Gráfico 2 – Comparativo dos valores de permeabilidade entre Chapuis x Laboratório x Modelo proposto



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Por final, comparando o modelo de Kozeny-Carman (1938), sendo a formulação que apresentou maiores valores de permeabilidade para os mesmos parâmetros de solo. A equação apontando erros entre 16 e 1065 vezes os valores de laboratório. Observa-se que o modelo citado é seriamente sensível a solos finos, não revelando-se uma formulação adequada para tal tipo de material. A Tabela 11 e Gráfico 3 apresentam o comportamento da permeabilidade em um comparativo com outras formulações.

Tabela 11 – Comparação do erro entre Kozeny-Carman e o modelo proposto em relação aos ensaios de laboratório

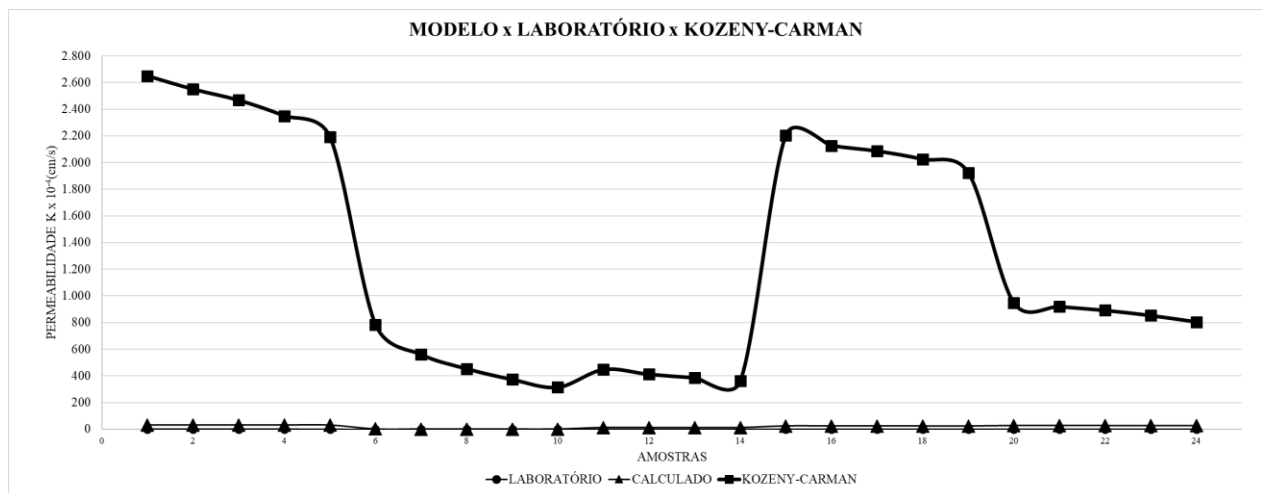
AMOSTRA	Laboratório k (cm/s)	Modelo preditivo k (cm/s)	Ordem do Erro do Modelo Preditivo	KOZENY- CARMAN k (cm/s)	Ordem do Erro
AM1-13	3,02E-03	3,16E-03	1,0	2,65E-01	87,7
AM1-25	2,96E-03	3,15E-03	1,1	2,55E-01	86,1
AM1-50	2,96E-03	3,13E-03	1,1	2,47E-01	83,3
AM1-100	2,91E-03	3,11E-03	1,1	2,35E-01	80,7
AM1-200	2,83E-03	3,08E-03	1,1	2,19E-01	77,5
AM2-13	3,21E-04	1,39E-04	0,4	7,85E-02	244,6
AM2-25	1,82E-04	1,25E-04	0,7	5,61E-02	308,1
AM2-50	9,17E-05	1,16E-04	1,3	4,53E-02	493,9

Continua

AMOSTRA	Laboratório k (cm/s)	Modelo preditivo k (cm/s)	Ordem do Erro do Modelo Preditivo	KOZENY- CARMAN k (cm/s)	Ordem do Erro
AM2-100	4,63E-05	1,08E-04	2,3	3,73E-02	804,6
AM2-200	2,95E-05	1,02E-04	3,5	3,14E-02	1064,9
AM4-25	2,58E-03	1,25E-03	0,5	4,47E-02	17,3
AM4-50	2,51E-03	1,23E-03	0,5	4,11E-02	16,4
AM4-100	2,41E-03	1,21E-03	0,5	3,86E-02	16,0
AM4-200	2,33E-03	1,20E-03	0,5	3,61E-02	15,5
AM5-13	2,79E-03	2,44E-03	0,9	2,20E-01	79,0
AM5-25	2,73E-03	2,42E-03	0,9	2,13E-01	77,9
AM5-50	2,70E-03	2,42E-03	0,9	2,09E-01	77,2
AM5-100	2,65E-03	2,40E-03	0,9	2,02E-01	76,4
AM5-200	2,59E-03	2,39E-03	0,9	1,92E-01	74,3
AM7-13	2,68E-03	2,72E-03	1,0	9,47E-02	35,3
AM7-25	2,61E-03	2,70E-03	1,0	9,19E-02	35,2
AM7-50	2,58E-03	2,69E-03	1,0	8,91E-02	34,5
AM7-100	2,54E-03	2,67E-03	1,1	8,52E-02	33,6
AM7-200	2,51E-03	2,65E-03	1,1	8,04E-02	32,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Gráfico 3 – Comparativo dos valores de permeabilidade entre Kozeny-Carman x Laboratório x Modelo proposto



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

#### 4.4 Validação da equação

A partir dos ensaios já mencionados na metodologia deste trabalho, parâmetros geotécnicos da amostra de validação, distinta das amostras para elaboração da equação proposta, foram obtidos para aplicação no modelo em estudo e em outras metodologias. Os resultados das características geotécnicas necessárias à aplicação nos modelos estão organizados na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros da amostra de validação

AMOSTRA	k (cm/s)	$e$	$\delta$	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	n
AMV1	1,56E-03	0,662	2,65	0,160	0,320	0,398
AMV2	9,56E-04	0,543	2,65	0,160	0,320	0,352
AMV3	3,70E-04	0,484	2,65	0,160	0,320	0,326

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Para validação do modelo empírico, os parâmetros acima, que são de uma amostra distinta ao domínio de amostras que foram envolvidas na elaboração da equação, foram aplicados no modelo empírico com a finalidade de verificar a precisão do modelo em estudo e compará-lo à outras metodologias de obtenção do coeficiente de permeabilidade.

Inicialmente, os valores dos parâmetros geotécnicos da amostra foram aplicados ao modelo proposto. Os resultados do coeficiente de permeabilidade pela equação e o seu erro em relação ao ensaio de permeabilidade a carga constante estão organizados na Tabela 13.

Tabela 13 – Coeficiente de permeabilidade pelo ensaio de laboratório e modelo preditivo com seus respectivos erros

AMOSTRA	Laboratório K (cm/s)	Modelo preditivo K (cm/s)	Ordem do Erro
AMV1	1,56E-03	3,19E-03	2,0
AMV2	9,56E-04	2,98E-03	3,1
AMV3	3,70E-04	2,86E-03	7,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os resultados obtidos pelo modelo mostraram-se satisfatórios. Tendo em vista que o erro variou entre 2 e 8 vezes os resultados dos ensaios de laboratório, que são considerados muito menores em relação aos outros modelos encontrados na literatura.

A permeabilidade da amostra em laboratório foi comparada também aos métodos de Hazen (1930), Chapuis (2004) e Kozeny-Carman (1938), que mais uma vez, apresentaram erros discrepantes em relação aos experimentos de laboratório. Os resultados dos coeficientes de permeabilidade a partir das metodologias citadas estão organizados nas Tabelas 14, 15 e 16, assim como seus erros em comparação aos ensaios de laboratório.

Tabela 14 – Coeficiente de permeabilidade pelo ensaio de laboratório e método de Hazen com seus respectivos erros

AMOSTRA	Laboratório k (cm/s)	Hazen k (cm/s)	Ordem do Erro
AMV1	1,56E-03	2,56E-02	16,4
AMV2	9,56E-04	2,56E-02	26,8
AMV3	3,70E-04	2,56E-02	69,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 15 – Coeficiente de permeabilidade pelo ensaio de laboratório e método de Chapuis com seus respectivos erros

AMOSTRA	Laboratório k (cm/s)	Chapuis k (cm/s)	Ordem do Erro
AMV1	1,56E-03	3,57E-02	22,9
AMV2	9,56E-04	2,38E-02	24,9
AMV3	3,70E-04	1,87E-02	50,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

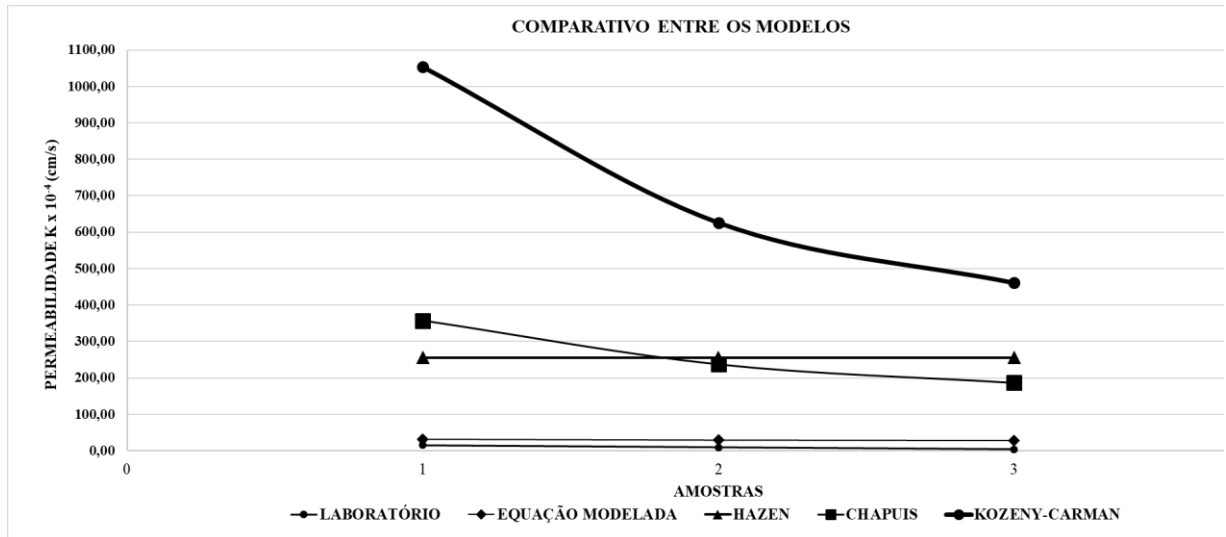
Tabela 16 – Coeficiente de permeabilidade pelo ensaio de laboratório e método de Kozeny-Carman com seus respectivos erros

AMOSTRA	Laboratório k (cm/s)	Kozeny-Carman k (cm/s)	Ordem do Erro
AMV1	1,56E-03	1,05E-01	67,6
AMV2	9,56E-04	6,26E-02	65,5
AMV3	3,70E-04	4,61E-02	124,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Em relação às outras metodologias, a equação formulada por esta pesquisa apresentou valores mais próximos aos resultados experimentais de permeabilidade, como pode ser mostrado no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Comparativo dos resultados de permeabilidade da amostra de validação



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A equação modelada mostrou-se mais apropriada para estimar o coeficiente de permeabilidade para esta amostra de solo em questão. Tendo em vista que os resultados apresentados por esta metodologia foram menos discrepantes em comparação aos modelos observados na literatura.

## 5 CONCLUSÕES

A seguir, serão apresentadas as principais conclusões sobre a pesquisa, apresentando limitações e dificuldades para elaboração da equação empírica, além de sugestões para pesquisas futuras sobre o tema abordado.

### 5.1 Conclusões

Conseguiu-se encontrar um modelo matemático para estimar o coeficiente de permeabilidade de solos arenosos a partir do desenvolvimento desta pesquisa. Por meio de ensaios de caracterização de solos, análise estatística e o estudo das principais características geotécnicas que se correlacionam de forma representativa para estimar o coeficiente de permeabilidade, permitindo a comparação da nova fórmula gerada à diferentes metodologias.

Como em outras metodologias, a granulometria e o índice de vazios (que tem correlação com a porosidade) foram correlacionados para formação da equação de permeabilidade. Outras características geotécnicas como a densidade real e o  $D_{60}$  não tiveram correlação estatística com a permeabilidade, ou seja, este fator contribui minimamente ou em nada para o fluxo de água por entre os vazios do solo.

Nos resultados comparados aos de laboratório, a equação empírica elaborada apresentou um erro médio de 33%, menor erro em comparação à outras metodologias. Este erro médio é considerado satisfatório para uma primeira análise deste trabalho, tendo em vista o número de amostras e as dificuldades para manuseio do aparelho de ensaio adaptado.

Os modelos de permeabilidade existentes apresentaram resultados que diferiram excessivamente dos resultados de laboratório. Foi possível avaliar a precisão da equação em um conjunto de dados distintos aos dados incorporados à elaboração da mesma, mostrando-se um modelo mais assertivo na estimativa do coeficiente de permeabilidade. Os resultados obtidos pelo modelo tiveram variação entre 2 e 8 vezes menor que outras equações, em comparação aos resultados de laboratório. Os modelos encontrados na literatura mostraram erros da ordem 16 a 125 vezes.

Uma dificuldade para elaboração da equação foi o número reduzido de amostras para realização dos ensaios, sugerindo em pesquisas futuras se usar um número muito maior de dados com o uso da mesma metodologia.



É importante citar que o modelo proposto por este trabalho não tem a intenção de substituir os ensaios de laboratório prescritos em normas regulamentadoras, mas pode ser implementado em fases preliminares de projetos em pequenas obras de drenagem, dando celeridade a esta etapa e resultados mais precisos.

## **5.2 Sugestões para pesquisas futuras**

Como sugestões para trabalho futuros, a citar:

- a) Aprimorar a equação com o aumento do número de amostras para se chegar a um conjunto de dados mais representativo;
- b) Validar a equação em um conjunto maior de dados reais;
- c) Expandir esta pesquisa para solos argilosos.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB 3324**: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB 3336**: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB 3338**: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: NBR 13292 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- CARMAN, P. C.. The determination of the specific surface of powders. **Journal Of The Chemical Society, Transactions**, p. 225, 1938.
- CARRIER III, W. David. Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129 n. 11, p. 1054-1056. nov. 2003.
- CHAPUIS, R. P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. **Canadian Geotechnical Journal**, v.41 n.5, p. 787-795, 2004.
- CHIOSSI, Nivaldo José. **Geologia de Engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- CRAIG, Robert F. **Mecânica dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2011.
- CEDERGREN, Harry R. **Seepage, drainage, and flow nets**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1989.
- DAS, Braja M.; SIVAKUGAN, Nagaratnam. **Fundamentals of Geotechnical Engineering**. 5. ed. Boston: Cengage Learning, 2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 093**: Solos - Determinação da densidade real. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DEVORE, Jay L.. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciência**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

DI MATTEO, Lucio; BIGOTTI, Federica; RICCO, Remo. Best-fit models to estimate modified proctor properties of compacted soil. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, n. 7, p. 992-996, 2009.

GURGUT, Yesim; SRIDHARAN, A. Compaction behaviour and prediction of its characteristics of fine grained soils with particular reference to compaction energy. **Soils and foundations**, v. 44, n. 5, p. 27-36, 2004.

HARR, Milton Edward. **Groundwater and Seepage**. New York: Mcgraw-hill, 1990.

HAZEN, Allen. **The Filtration of Public Water-Supplies**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1930.

HILF, Jack W. **An investigation of pore-water pressure in compaction cohesives soils**. 1956. 1 v. Tese (Doutorado) - Civil Engineering, United States Department of The Interior Bureau of Reclamation, Denver, 1956.

KOZENY, J. Ueber kapillare Leitung des Wassers im Bodem. **Wien, Akad. Wiss**, p. 271. abr. 1927.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1969.

LAMBE, T. W. The permeability of compacted fine grained soils. **Special Technical Publication**, ASTM, n. 163, p. 56-67, 1955.

MASSAD, Façal. **Mecânica dos solos experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

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

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2014.

OLSEN, H. W. **Hydraulic Flow Through Saturated Clay**. 1962. Tese (Sc.D.), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1962.

OMAR, Maher et al. Compaction characteristics of granular soils in United Arab Emirates. **Geotechnical & Geological Engineering**, v.21 n. 3, p. 283-295, 2003.

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

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

TAYLOR, Donald W. **Fundamental of Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1948.

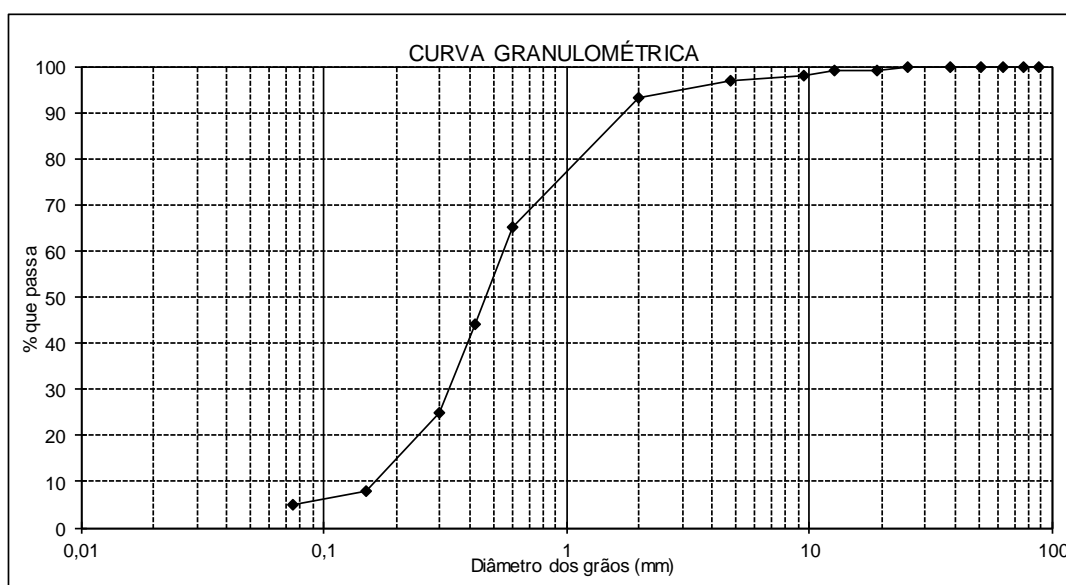
TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996.

WANG, M. C.; HUANG, C. C. Soil Compaction and Permeability Prediction Models. **Journal of Environmental Engineering**. [S. l.], p. 1063-1083. dez. 1984.

ZEVIANI, Walmes Marques; RIBEIRO JÚNIOR, Paulo Justiniano; BONAT, Wagner Hugo. **Modelos de regressão não linear**. Campina Grande: [s.n], 2013.

## APÊNDICE A – RESULTADO DOS ENSAIOS DE GRANULOMETRIA

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO						
AMOSTRA 1						
<b>UMIDADE</b>						
CÁPSULA Nº 1			AMOSTRA TOTAL		TOTAL	
P.b.h.	96,85		P. ÚMIDO		1000,21	
P.b.s.	95,29		P. RETIDO NA # Nº 10		71,26	
Tara	22,42		P.h. PASSA # Nº 10		928,95	
ÁGUA	1,56		P.s. PASSA # Nº 10		928,76	
SOLO SECO	72,87		P. AMOSTRA SECA		1000,02	
UMIDADE %	0,02					
P E N E I R A S G R O S S O  F I N O	PENEIRAS		P. RETIDO	PESO	% PASSA	OBSERVAÇÕES:
	POLEGADAS	mm	PARCIAL (g)	PASSA (g)	AM.TOTAL	
	3 1/2"	88,9	0,00	1000,02	100	
	3"	76,2	0,00	1000,02	100	
	2 1/2"	63,3	0,00	1000,02	100	
	2"	50,8	0,00	1000,02	100	
	1 1/2"	38,1	0,00	1000,02	100	
	1"	25,4	0,00	1000,02	100	
	3/4"	19,1	10,72	989,30	99	
	1/2"	12,7	0,00	989,30	99	
	3/8"	9,5	5,75	983,55	98	
	Nº 4	4,76	11,29	972,26	97	
	Nº 10	2	43,50	928,76	93	
	Nº 30	0,60	36,51	83,77	65	
	Nº 40	0,42	27,14	56,63	44	
Nº 50	0,30	24,39	32,24	25		
Nº 100	0,15	22,29	9,95	8		
Nº 200	0,075	3,84	6,11	5		
<b>COMP. GRANULOMÉTRICA (%)</b>						
					PEDREGULHO:	7
					AREIA GROSSA:	28
					AREIA MÉDIA:	57
					AREIA FINA:	3
					SILTE+ARGILA:	5



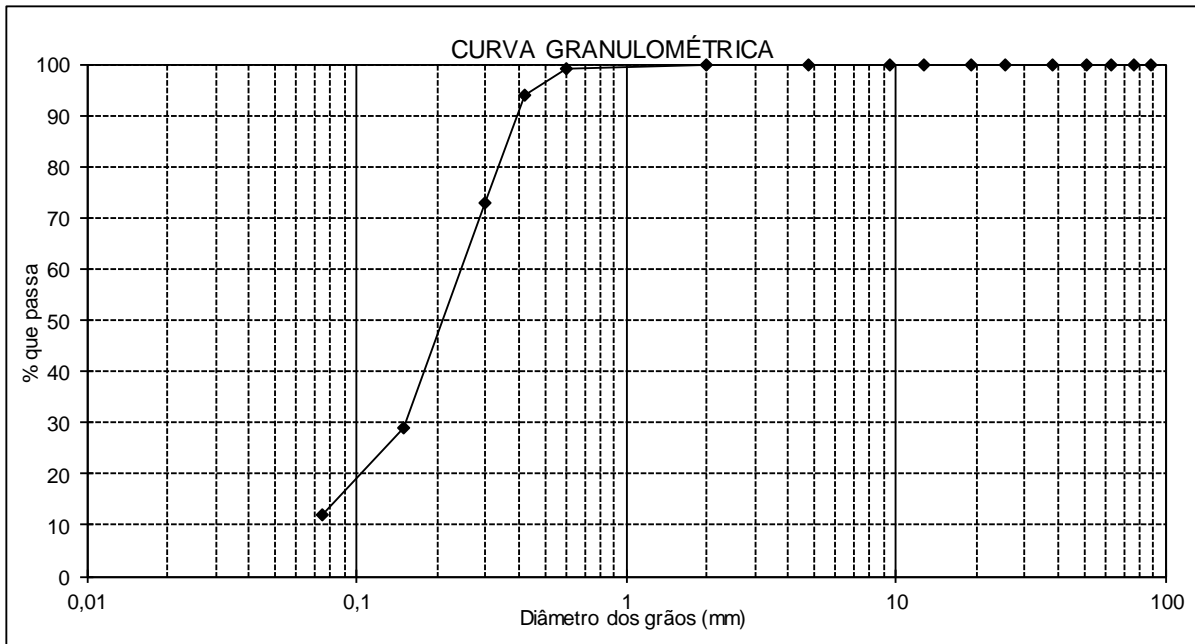
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO

AMOSTRA 2

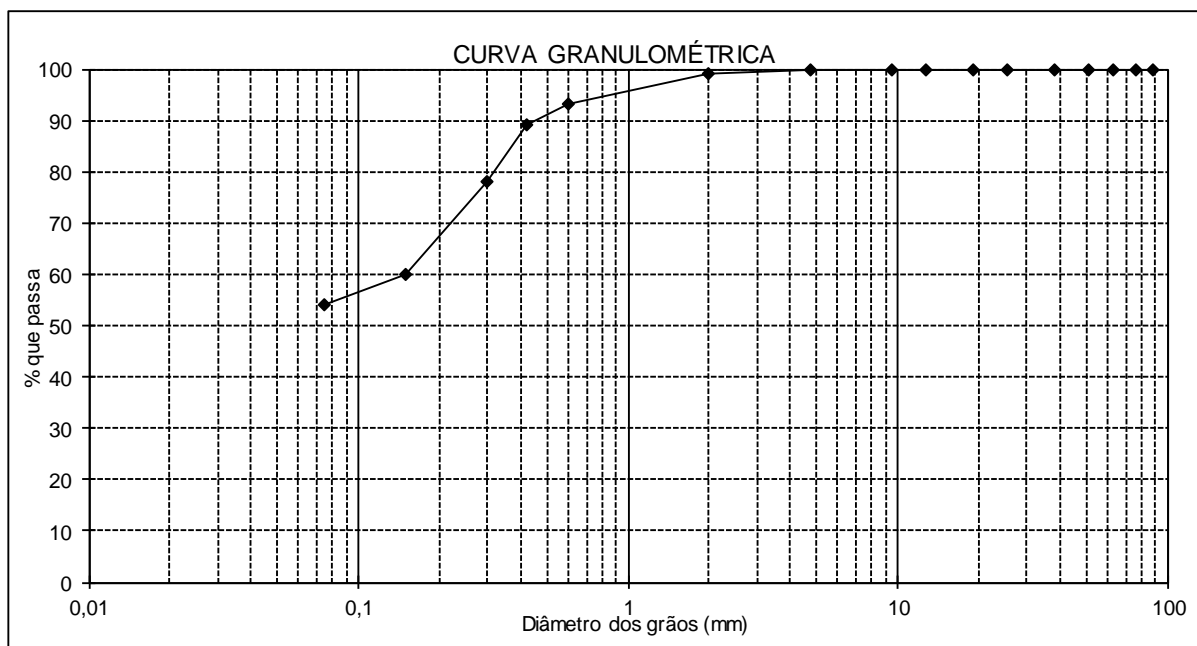
UMIDADE

CÁPSULA Nº	41	AMOSTRA TOTAL	TOTAL	PARCIAL
P.b.h.	33,12	P. ÚMIDO	1000,21	
P.b.s.	32,62	P. RETIDO NA # Nº 10	3,71	
Tara	5,68	P.h. PASSA # Nº 10	996,50	120,07
ÁGUA	0,50	P.s. PASSA # Nº 10	996,30	120,05
SOLO SECO	26,94	P. AMOSTRA SECA	1000,01	120,05
UMIDADE %	0,02			

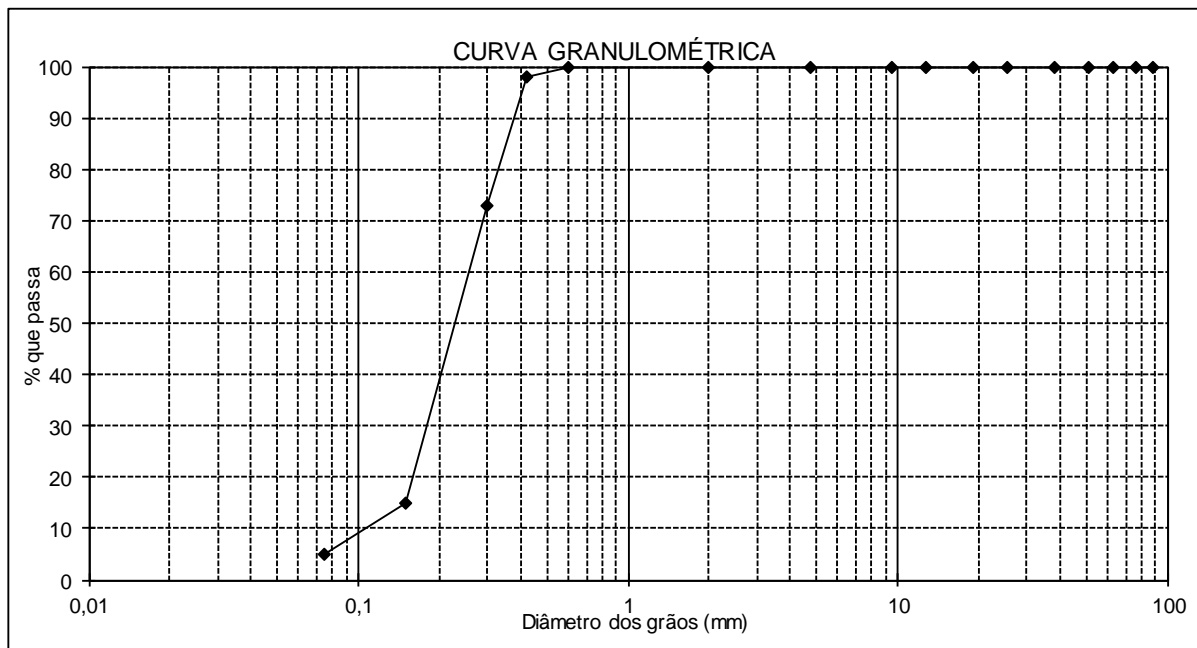
P E N E I R A S	PENEIRAS		P. RETIDO PARCIAL (g)	PESO PASSA (g)	% PASSA AM.TOTAL	OBSERVAÇÕES:	
	POLEGADAS	mm					
N . G R O S S O	3 1/2"	88,9	0,00	1000,01	100		COMP.GRANULOMÉTRICA (%) PEDREGULHO: 0 AREIA GROSSA: 1 AREIA MÉDIA: 70 AREIA FINA: 17 SILTE+ARGILA: 12
	3"	76,2	0,00	1000,01	100		
	2 1/2"	63,3	0,00	1000,01	100		
	2"	50,8	0,00	1000,01	100		
	1 1/2"	38,1	0,00	1000,01	100		
	1"	25,4	0,00	1000,01	100		
	3/4"	19,1	0,00	1000,01	100		
	1/2"	12,7	0,00	1000,01	100		
	3/8"	9,5	0,00	1000,01	100		
	Nº 4	4,76	1,08	998,93	100		
F I N O	Nº 10	2	2,63	996,30	100		
	Nº 30	0,60	1,68	118,37	99		
	Nº 40	0,42	5,61	112,76	94		
	Nº 50	0,30	24,75	88,01	73		
	Nº 100	0,15	53,22	34,79	29		
	Nº 200	0,075	20,41	14,38	12		



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO						
AMOSTRA 3						
UMIDADE						
CÁPSULA Nº	28	AMOSTRA TOTAL		TOTAL	PARCIAL	
P.b.h.	83,90	P. ÚMIDO		1000,15		
P.b.s.	82,40	P. RETIDO NA # Nº 10		7,86		
Tara	12,31	P.h. PASSA # Nº 10		992,29	120,03	
ÁGUA	1,50	P.s. PASSA # Nº 10		992,09	120,01	
SOLO SECO	70,09	P. AMOSTRA SECA		999,95	120,01	
UMIDADE %	0,02					
P E N E I R A S O B S E R V A Ç Õ E S:	PENEIRAS		P. RETIDO	PESO	% PASSA	OBSERVAÇÕES:
	POLEGADAS	mm	PARCIAL (g)	PASSA (g)	AM.TOTAL	
	Nº 3 1/2"	88,9	0,00	999,95	100	
	Nº 3"	76,2	0,00	999,95	100	
	Nº 2 1/2"	63,3	0,00	999,95	100	
	Nº 2"	50,8	0,00	999,95	100	
	Nº 1 1/2"	38,1	0,00	999,95	100	
	Nº 1"	25,4	0,00	999,95	100	
	Nº 3/4"	19,1	0,00	999,95	100	
	Nº 1/2"	12,7	0,00	999,95	100	
	Nº 3/8"	9,5	0,00	999,95	100	
	Nº 4	4,76	0,19	999,76	100	
	Nº 10	2	7,67	992,09	99	
F I N O	Nº 30	0,60	7,29	112,72	93	
	Nº 40	0,42	5,43	107,29	89	
	Nº 50	0,30	12,41	94,88	78	
	Nº 100	0,15	22,17	72,71	60	
	Nº 200	0,075	7,55	65,16	54	
COMP.GRANULOMÉTRICA (%)						
PEDREGULHO:				1		
AREIA GROSSA:				6		
AREIA MÉDIA:				33		
AREIA FINA:				6		
SILTE+ARGILA:				54		



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO						
AMOSTRA 4						
UMIDADE						
CÁPSULA Nº	30	AMOSTRA TOTAL		TOTAL	PARCIAL	
P.b.h.	143,86	P. ÚMIDO		1000,00		
P.b.s.	143,32	P. RETIDO NA # Nº 10		0,00		
Tara	25,57	P.h. PASSA # Nº 10		1000,00	120,32	
ÁGUA	0,54	P.s. PASSA # Nº 10		1000,00	120,32	
SOLO SECO	117,75	P. AMOSTRA SECA		1000,00	120,32	
UMIDADE %	0,00					
P	PENEIRAS		P.RETIDO	PESO	% PASSA	OBSERVAÇÕES:
E	POLEGADAS	mm	PARCIAL (g)	PASSA (g)	AM.TOTAL	
N	3 1/2"	88,9	0,00	1000,00	100	
.	3"	76,2	0,00	1000,00	100	
G	2 1/2"	63,3	0,00	1000,00	100	
R	2"	50,8	0,00	1000,00	100	
O	1 1/2"	38,1	0,00	1000,00	100	
S	1"	25,4	0,00	1000,00	100	
S	3/4"	19,1	0,00	1000,00	100	
O	1/2"	12,7	0,00	1000,00	100	
	3/8"	9,5	0,00	1000,00	100	
	Nº 4	4,76	0,00	1000,00	100	
	Nº 10	2	0,00	1000,00	100	
	Nº 30	0,60	0,00	120,32	100	
	Nº 40	0,42	2,52	117,80	98	
F	Nº 50	0,30	30,08	87,72	73	
I	Nº 100	0,15	69,82	17,90	15	
N	Nº 200	0,075	11,65	6,25	5	
Q						
COMP.GRANULOMÉTRICA (%)						
				PEDREGULHO:	0	
				AREIA GROSSA:	0	
				AREIA MÉDIA:	85	
				AREIA FINA:	10	
				SILTE+ARGILA:	5	

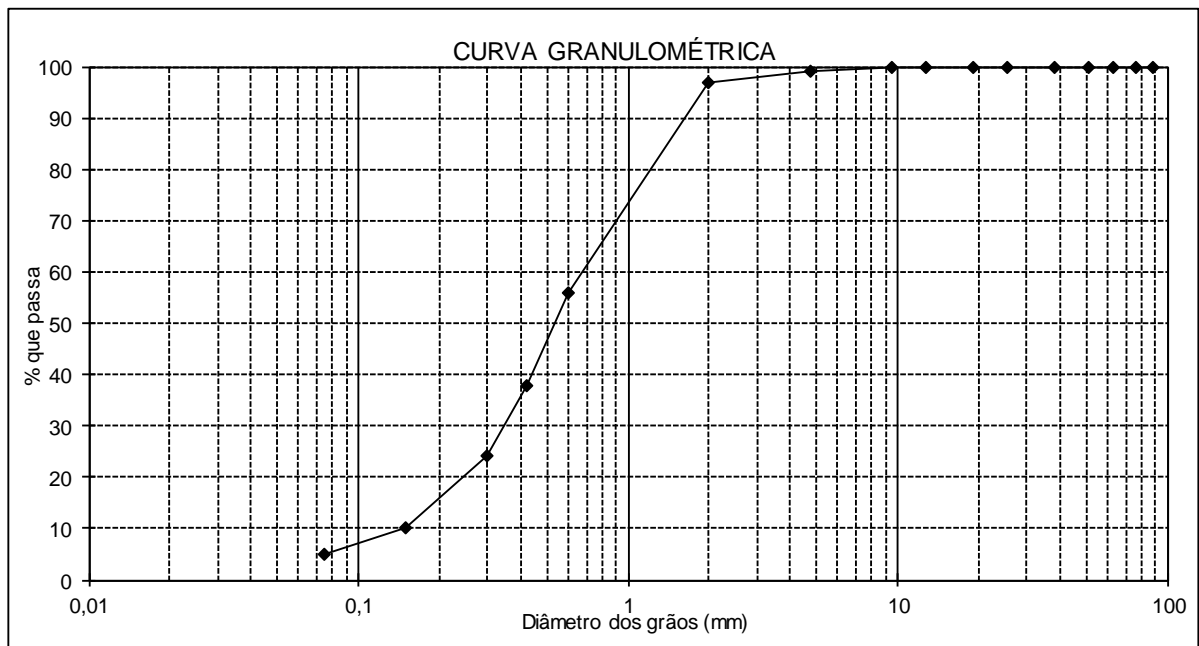




ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO

AMOSTRA 5

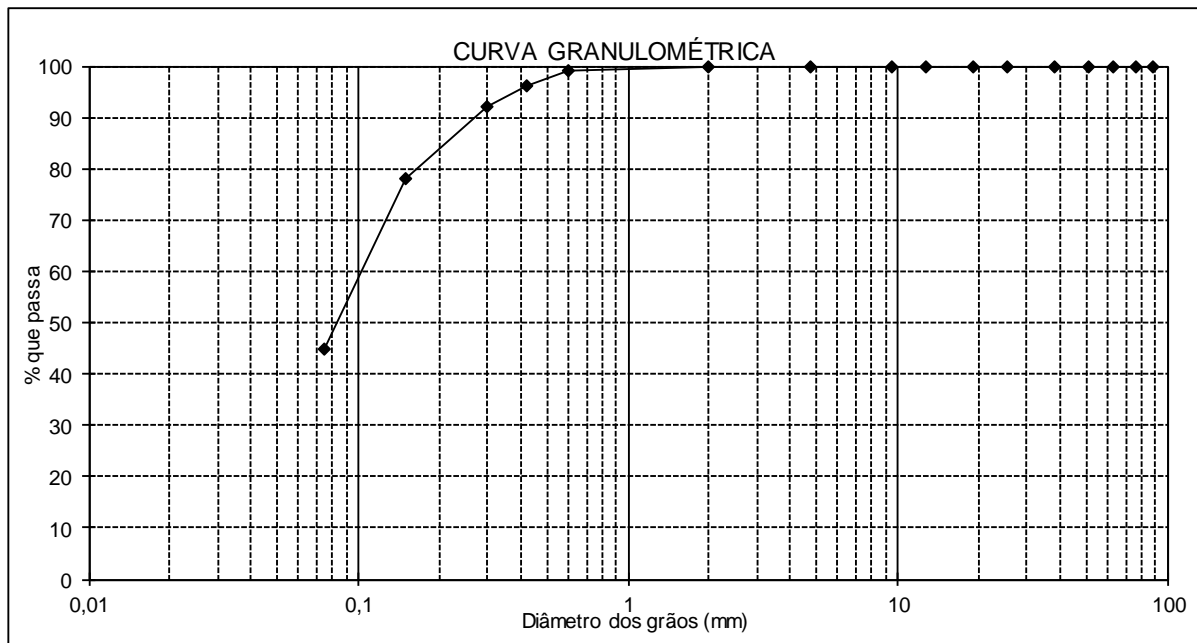
UMIDADE		PENEIRAS		P. RETIDO	PESO	% PASSA	OBSERVAÇÕES:	
CÁPSULA Nº	2	POLEGADAS	mm	PARCIAL (g)	PASSA (g)	AM.TOTAL		
P.b.h.	128,44			AMOSTRA TOTAL				TOTAL
P.b.s.	128,37			P. ÚMIDO				1000,25
Tara	24,63			P. RETIDO NA # Nº 10				29,35
ÁGUA	0,07			P.h. PASSA # Nº 10				120,01
SOLO SECO	103,74			P.s. PASSA # Nº 10				120,01
UMIDADE %	0,00			P. AMOSTRA SECA				1000,25
P E N E I R A S	Nº 3 1/2"	88,9	0,00	1000,25	100	COMP.GRANULOMÉTRICA (%)		
	3"	76,2	0,00	1000,25	100			
	2 1/2"	63,3	0,00	1000,25	100			
	2"	50,8	0,00	1000,25	100			
	1 1/2"	38,1	0,00	1000,25	100			
	1"	25,4	0,00	1000,25	100			
	3/4"	19,1	0,00	1000,25	100			
	1/2"	12,7	0,00	1000,25	100			
	Nº 4	4,76	3,04	994,89	99		PEDREGULHO:	3
	Nº 10	2	23,99	970,90	97		AREIA GROSSA:	41
	F I N O	Nº 30	0,60	50,45	69,56		56	AREIA MÉDIA:
Nº 40		0,42	22,65	46,91	38	AREIA FINA:	5	
Nº 50		0,30	17,54	29,37	24	SILTE+ARGILA:	5	
Nº 100		0,15	16,84	12,53	10			
Nº 200		0,075	5,73	6,80	5			



## ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO

AMOSTRA 6

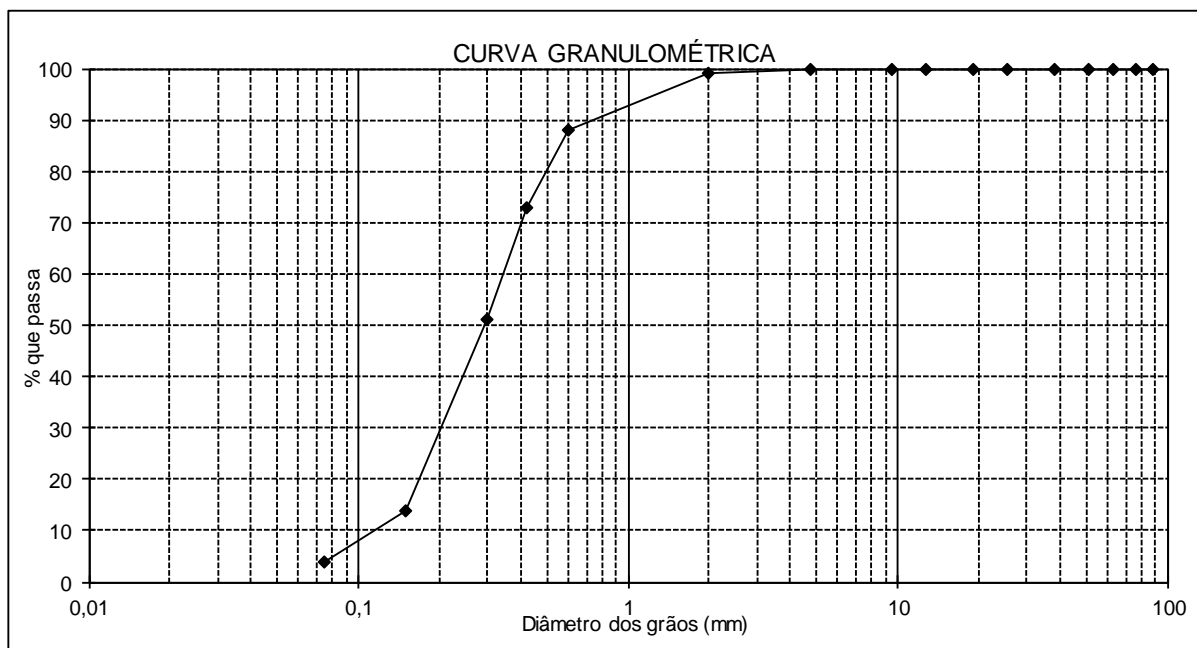
UMIDADE							
CÁPSULA Nº	66	AMOSTRA TOTAL		TOTAL	PARCIAL		
P.b.h.	30,68	P. ÚMIDO		1000,38			
P.b.s.	30,61	P. RETIDO NA # Nº 10		3,75			
Tara	6,65	P.h. PASSA # Nº 10		996,63	120,20		
ÁGUA	0,07	P.s. PASSA # Nº 10		996,63	120,20		
SOLO SECO	23,96	P. AMOSTRA SECA		1000,38	120,20		
UMIDADE %	0,00						
P E N E I R A S	PENEIRAS		P. RETIDO PARCIAL (g)	PESO PASSA (g)	% PASSA AM.TOTAL	OBSERVAÇÕES:	
	POLEGADAS	mm					
N	3 1/2"	88,9	0,00	1000,38	100		COMP.GRANULOMÉTRICA (%) PEDREGULHO: 0 AREIA GROSSA: 1 AREIA MÉDIA: 21 AREIA FINA: 33 SILTE+ARGILA: 45
.	3"	76,2	0,00	1000,38	100		
G	2 1/2"	63,3	0,00	1000,38	100		
R	2"	50,8	0,00	1000,38	100		
O	1 1/2"	38,1	0,00	1000,38	100		
S	1"	25,4	0,00	1000,38	100		
S	3/4"	19,1	0,00	1000,38	100		
O	1/2"	12,7	0,00	1000,38	100		
	3/8"	9,5	0,00	1000,38	100		
	Nº 4	4,76	0,90	999,48	100		
	Nº 10	2	2,85	996,63	100		
F	Nº 30	0,60	1,08	119,12	99		
I	Nº 40	0,42	3,14	115,98	96		
N	Nº 50	0,30	4,90	111,08	92		
	Nº 100	0,15	17,13	93,95	78		
O	Nº 200	0,075	40,15	53,80	45		



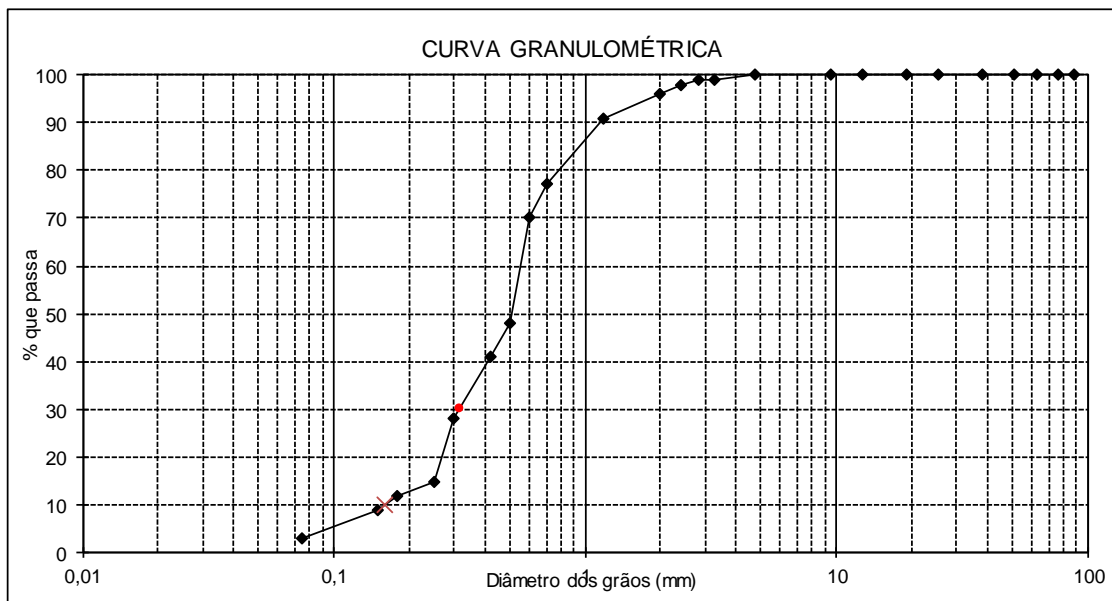
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO

AMOSTRA 7

UMIDADE		PENEIRAS		P. RETIDO	PESO	% PASSA	OBSERVAÇÕES:
CÁPSULA Nº		POLEGADAS	mm	PARCIAL (g)	PASSA (g)	AM.TOTAL	
25							COMP. GRANULOMÉTRICA (%) PEDREGULHO: 1 AREIA GROSSA: 11 AREIA MÉDIA: 74 AREIA FINA: 10 SILTE+ARGILA: 4
P.b.h.	89,64						
P.b.s.	88,08						
Tara	21,38						
ÁGUA	1,56						
SOLO SECO	66,70						
UMIDADE %	0,02						
P							
E							
N							
G							
R							
O							
S							
S							
O							
F							
I							
N							
O							



ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO					
					AMOSTRA DE VALIDAÇÃO
UMIDADE					
CÁPSULA Nº	28	AMOSTRA TOTAL		TOTAL	
P.b.h.		P. ÚMIDO		1474,12	
P.b.s.		P. RETIDO NA # Nº 10		0,00	
Tara		P.h. PASSA # Nº 10		1474,12	
ÁGUA		P.s. PASSA # Nº 10		1474,12	
SOLO SECO		P. AMOSTRA SECA		1474,12	
UMIDADE %	0,00				
PENEIRAS		P.RETIDO PARCIAL (g)	PESO PASSA (g)	% PASSA AM.TOTAL	OBSERVAÇÕES:
POLEGADAS	mm				
3 1/2"	88,9	0,00	1474,12	100	
3"	76,2	0,00	1474,12	100	
2 1/2"	63,3	0,00	1474,12	100	
2"	50,8	0,00	1474,12	100	
1 1/2"	38,1	0,00	1474,12	100	
1"	25,4	0,00	1474,12	100	
3/4"	19,1	0,00	1474,12	100	
1/2"	12,7	0,00	1474,12	100	
3/8"	9,5	0,00	1474,12	100	
Nº 4	4,76	0,00	1474,12	100	
Nº 10	3,3	13,07	1461,05	99	COMP.GRANULOMÉTRICA (%) PEDREGULHO: 0 AREIA GROSSA: 4 AREIA MÉDIA: 55 AREIA FINA: 41 SILTE+ARGILA: 0  D10 0,160 D30 0,320
	2,83	7,25	1453,80	99	
2,4	14,44	1439,36	98		
2	17,16	1422,20	96		
1,8	86,64	1335,56	91		
0,71	205,23	1130,33	77		
Nº 30	0,60	101,80	1028,53	70	
0,50	322,45	706,08	48		
Nº 40	0,42	100,01	606,07	41	
Nº 50	0,30	190,01	416,06	28	
Nº 100	0,25	190,11	225,95	15	
	0,18	55,15	170,80	12	
	0,15	40,00	130,80	9	
Nº 200	0,075	88,86	41,94	3	



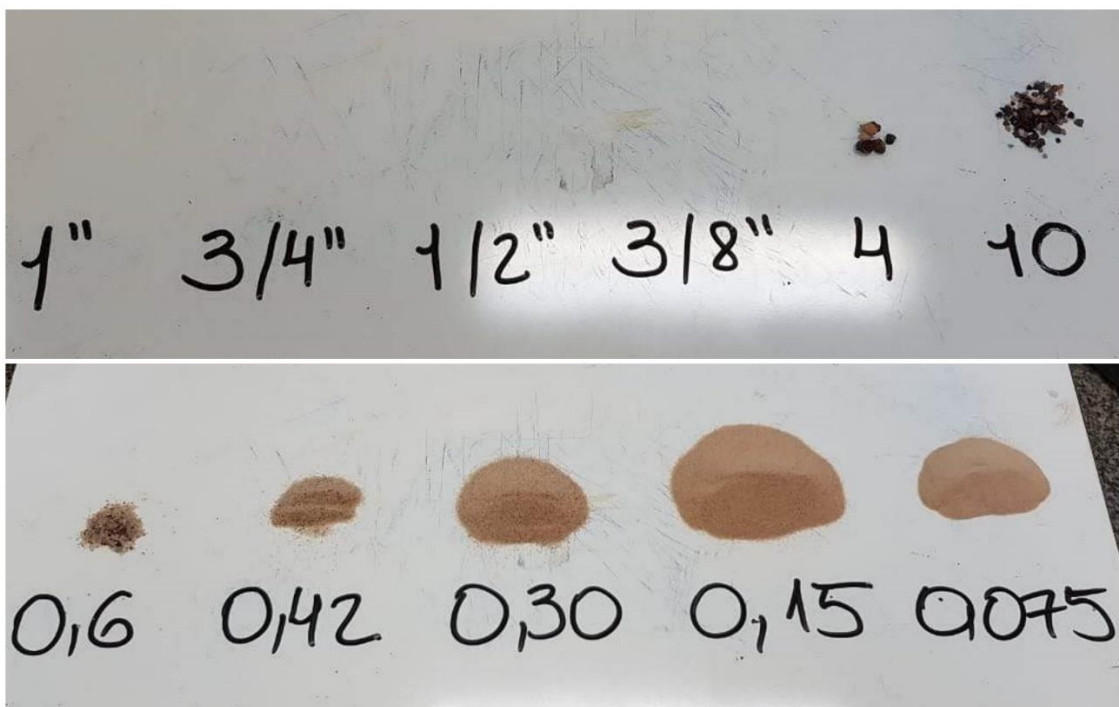
## APÊNDICE B – RELATÓRIO FOTOGRÁFICO DO ENSAIO GRANULOMÉTRICO

Figura 20 – Fração granulométrica AM01



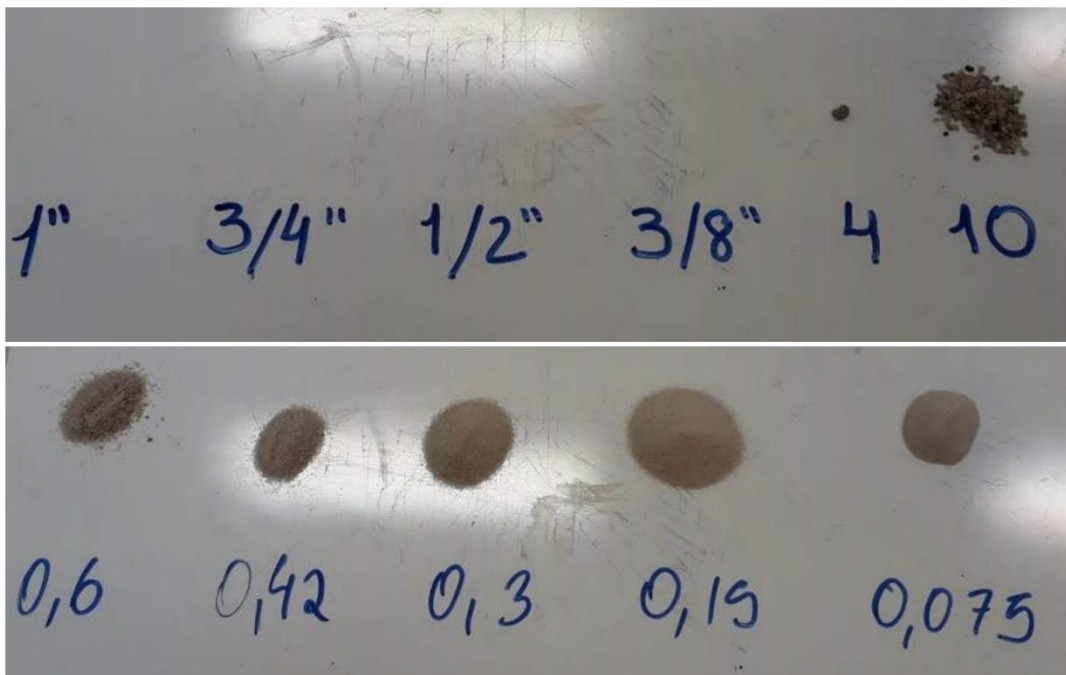
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Fração granulométrica AM02



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Fração granulométrica AM03



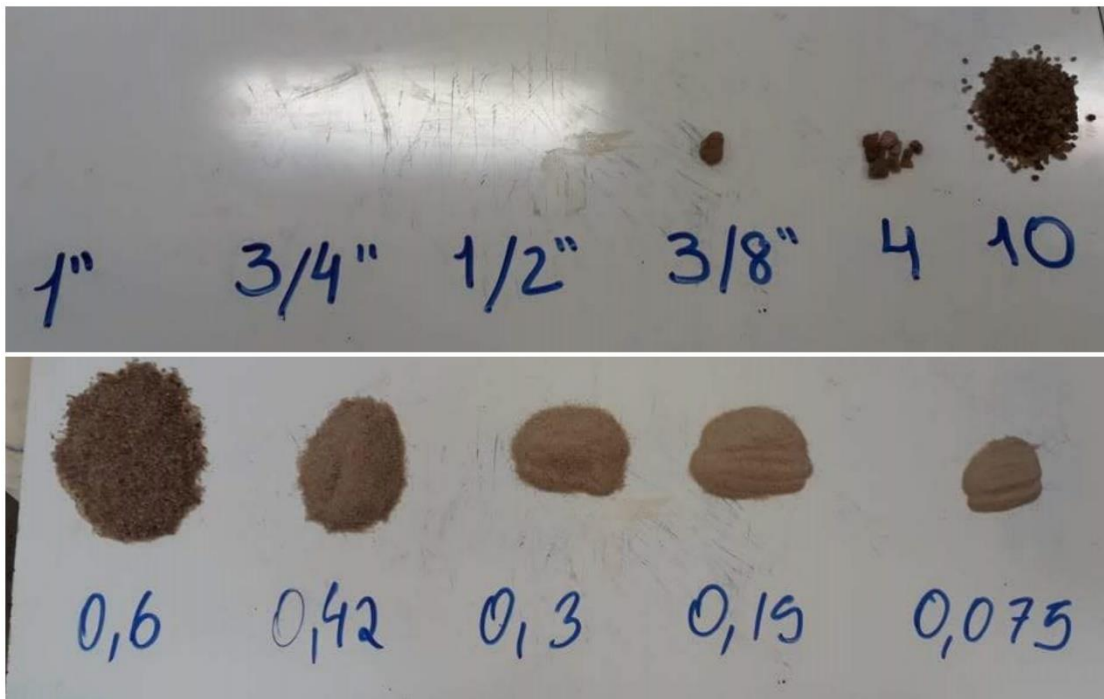
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Fração granulométrica AM04



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Fração granulométrica AM05



Fonte: Elaborado pelo autor.

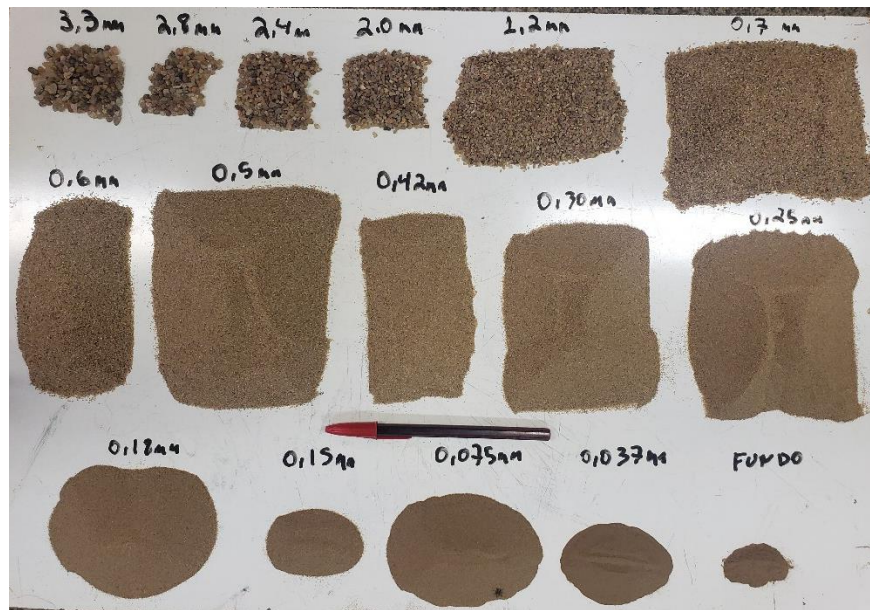
Figura 25 - Fração granulométrica AM07



Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 26 - Fração granulométrica amostra de validação





**APÊNDICE C – RESULTADO DOS ENSAIOS DE DENSIDADE REAL DOS GRÃOS**

DENSIDADE DOS GRÃOS										
AMOSTRAS	P1 (g)	P2 (g)	P3 (g)	P4 (g)	$\delta$	$\Delta\delta$	$\delta$	T°	K20	$\delta$ -20°
AM-01	29,68	39,67	85,94	79,69	2,671					
	29,61	39,61	85,68	79,44	2,660	0,004	2,668	28	0,9980	2,66
	29,39	39,38	86,04	79,80	2,664					
AM-02	29,94	39,92	86,57	80,29	2,697					
	30,01	40,01	86,62	80,32	2,703	0,005	2,700	28	0,9980	2,69
	29,21	39,22	85,78	79,52	2,669					
AM-03	29,39	39,40	85,67	79,43	2,655					
	29,92	39,93	86,82	80,59	2,648	0,003	2,652	28	0,9980	2,65
	28,79	38,81	85,75	79,50	2,658					
AM-04	29,40	39,40	85,70	79,43	2,681					
	29,20	39,23	85,78	79,52	2,660	0,000	2,660	28	0,9980	2,66
	29,61	39,64	85,70	79,44	2,660					
AM-05	30,00	40,01	86,58	80,32	2,669					
	29,92	39,93	86,57	80,29	2,684	0,000	2,669	28	0,9980	2,66
	34,17	44,18	90,95	84,69	2,669					
AM-06	29,68	39,68	85,99	79,69	2,703					
	29,38	39,38	86,08	79,78	2,703	0,000	2,703	28	0,9980	2,70
	28,67	38,69	85,69	79,38	2,701					
AM-07	29,91	40,01	86,89	80,57	2,672					
	29,68	39,75	85,99	79,68	2,678	0,006	2,675	28	0,9980	2,67
	34,17	44,25	91,01	84,67	2,695					
AMOSTRA DE VALIDAÇÃO	29,84	39,79	86,29	80,08	2,660					
	29,92	39,96	86,53	80,27	2,656	0,004	2,658	27	0,9983	2,65
	29,39	39,41	85,66	79,43	2,644					

## APÊNDICE D – RESULTADO DOS ENSAIOS EDOMÉTRICOS

DADOS DA AMOSTRA 01					
<b>Dados do amostrador</b>					
Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )		
2,50	11,25	99,40	248,50		
<b>Parâmetros iniciais</b>					
Massa Seca (g)	Densidade seca (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Índice de vazios inicial	Grau de saturação inicial (%)	Gs
353,59	1,42	0,0%	0,869	0,0%	2,66
<b>Leitura inicial (Antes do carregamento)</b>					
Leitura inicial (Antes do carregamento)	Leitura (início do carregamento)	Índice de vazios (início do carregamento)			
9,770	9,549	0,852			
<b>CARGA (kPa)</b>					
CARGA (kPa)	Log(s)	$\Delta H$ (mm)		e	
13	1,1	0,030	0,003	0,866	
25	1,4	0,140	0,013	0,853	
50	1,7	0,124	0,012	0,842	
100	2,0	0,164	0,015	0,826	
200	2,3	0,239	0,022	0,804	

---

**LEITURAS DOS CARREGAMENTOS**

---

**AMOSTRA 01**

---

<b>CARGA</b>		<b>13 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>Δe</b>	<b>e</b>	
0	0,00	9,579	0,000	25,000	0,000	0,852	0,030
0,1	0,32	9,570	0,009	24,991	0,001	0,852	
0,2	0,45	9,570	0,000	24,991	0,000	0,852	
0,5	0,71	9,570	0,000	24,991	0,000	0,852	
1	1,00	9,570	0,000	24,991	0,000	0,852	
2	1,41	9,570	0,000	24,991	0,000	0,852	
4	2,00	9,568	0,002	24,989	0,000	0,851	
8	2,83	9,562	0,006	24,983	0,001	0,851	
15	3,87	9,559	0,003	24,980	0,000	0,851	
30	5,48	9,552	0,007	24,973	0,001	0,850	
45	6,71	9,549	0,003	24,970	0,000	0,850	
60	7,75	9,549	0,000	24,970	0,000	0,850	
120	10,95	9,549	0,000	24,970	0,000	0,850	
180	13,42	9,549	0,000	24,970	0,000	0,850	
240	15,49	9,549	0,000	24,970	0,000	0,850	
1440	37,95	9,549	0,000	24,970	0,000	0,850	

---

<b>CARGA</b>		<b>25 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>Δe</b>	<b>e</b>	
0	0,00	9,549	0,000	24,970	0,000	0,850	0,140
0,1	0,32	9,485	0,064	24,906	0,006	0,844	
0,2	0,45	9,481	0,004	24,902	0,000	0,843	
0,5	0,71	9,481	0,000	24,902	0,000	0,843	
1	1,00	9,480	0,001	24,901	0,000	0,843	
2	1,41	9,479	0,001	24,900	0,000	0,843	
4	2,00	9,477	0,002	24,898	0,000	0,843	
8	2,83	9,472	0,005	24,893	0,000	0,842	
15	3,87	9,409	0,063	24,830	0,006	0,837	
30	5,48	9,409	0,000	24,830	0,000	0,837	
45	6,71	9,409	0,000	24,830	0,000	0,837	
60	7,75	9,409	0,000	24,830	0,000	0,837	
120	10,95	9,409	0,000	24,830	0,000	0,837	
180	13,42	9,409	0,000	24,830	0,000	0,837	
240	15,49	9,409	0,000	24,830	0,000	0,837	
1440	37,95	9,409	0,000	24,830	0,000	0,837	

---

<b>CARGA</b>		<b>50 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>Δe</b>	<b>e</b>	
0	0,00	9,409	0,000	24,830	0,000	0,837	0,124
0,1	0,32	9,320	0,089	24,741	0,008	0,828	
0,2	0,45	9,309	0,011	24,730	0,001	0,827	
0,5	0,71	9,305	0,004	24,726	0,000	0,827	
1	1,00	9,301	0,004	24,722	0,000	0,826	
2	1,41	9,299	0,002	24,720	0,000	0,826	
4	2,00	9,297	0,002	24,718	0,000	0,826	
8	2,83	9,291	0,006	24,712	0,001	0,826	
15	3,87	9,288	0,003	24,709	0,000	0,825	
30	5,48	9,285	0,003	24,706	0,000	0,825	
45	6,71	9,285	0,000	24,706	0,000	0,825	
60	7,75	9,285	0,000	24,706	0,000	0,825	
120	10,95	9,285	0,000	24,706	0,000	0,825	
180	13,42	9,285	0,000	24,706	0,000	0,825	
240	15,49	9,285	0,000	24,706	0,000	0,825	
1440	37,95	9,285	0,000	24,706	0,000	0,825	

<b>CARGA</b>		<b>100 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>Δe</b>	<b>e</b>	
0	0,00	9,285	0,000	24,706	0,000	0,825	0,164
0,1	0,32	9,150	0,135	24,571	0,013	0,812	
0,2	0,45	9,145	0,005	24,566	0,000	0,812	
0,5	0,71	9,140	0,005	24,561	0,000	0,811	
1	1,00	9,140	0,000	24,561	0,000	0,811	
2	1,41	9,135	0,005	24,556	0,000	0,811	
4	2,00	9,131	0,004	24,552	0,000	0,811	
8	2,83	9,129	0,002	24,550	0,000	0,810	
15	3,87	9,122	0,007	24,543	0,001	0,810	
30	5,48	9,121	0,001	24,542	0,000	0,810	
45	6,71	9,121	0,000	24,542	0,000	0,810	
60	7,75	9,121	0,000	24,542	0,000	0,810	
120	10,95	9,121	0,000	24,542	0,000	0,810	
180	13,42	9,121	0,000	24,542	0,000	0,810	
240	15,49	9,121	0,000	24,542	0,000	0,810	
1440	37,95	9,121	0,000	24,542	0,000	0,810	

CARGA	200 Kpa			COM INUNDAÇÃO			DH (mm)
	Tempo	Raiz (t)	Leitura	DH (mm)	H (mm)	$\Delta e$	
0	0,00	9,121	0,000	24,542	0,000	0,810	0,239
0,1	0,32	8,920	0,201	24,341	0,019	0,791	
0,2	0,45	8,915	0,005	24,336	0,000	0,790	
0,5	0,71	8,910	0,005	24,331	0,000	0,790	
1	1,00	8,908	0,002	24,329	0,000	0,790	
2	1,41	8,902	0,006	24,323	0,001	0,789	
4	2,00	8,900	0,002	24,321	0,000	0,789	
8	2,83	8,893	0,007	24,314	0,001	0,788	
15	3,87	8,891	0,002	24,312	0,000	0,788	
30	5,48	8,882	0,009	24,303	0,001	0,787	
45	6,71	8,882	0,000	24,303	0,000	0,787	
60	7,75	8,882	0,000	24,303	0,000	0,787	
120	10,95	8,882	0,000	24,303	0,000	0,787	
180	13,42	8,882	0,000	24,303	0,000	0,787	
240	15,49	8,882	0,000	24,303	0,000	0,787	
1440	37,95	8,882	0,000	24,303	0,000	0,787	

---

**DADOS DA AMOSTRA 02**

---

---

**Dados do amostrador**

---

<b>Altura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>
2,50	11,25	99,40	248,50

---

---

**Parâmetros iniciais**

---

<b>Massa Seca (g)</b>	<b>Densidade seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Índice de vazios inicial</b>	<b>Grau de saturação inicial (%)</b>	<b>Gs</b>
316,45	1,27	0,0%	1,112	0,0%	2,69

---

---

<b>Leitura inicial (Antes do carregamento)</b>	<b>Leitura (início do carregamento)</b>	<b>Índice de vazios (início do carregamento)</b>
--	---	--

---

8,929	6,298	0,890
-------	-------	-------

---

---

<b>CARGA (kPa)</b>	<b>Log(s)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b>e</b>	
13	1,1	2,122	0,224	0,888
25	1,4	1,043	0,110	0,778
50	1,7	0,586	0,062	0,716
100	2,0	0,487	0,051	0,664
200	2,3	0,401	0,042	0,622

---

**LEITURAS DOS CARREGAMENTOS****AMOSTRA 02**

<b>CARGA</b>	<b>13 Kpa</b>			<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	$\Delta e$	
0	0,00	8,420	0,000	25,000	0,000	0,890	2,122
0,1	0,32	8,360	0,060	24,940	0,006	0,883	
0,2	0,45	8,330	0,030	24,910	0,003	0,880	
0,5	0,71	8,300	0,030	24,880	0,003	0,877	
1	1,00	7,200	1,100	23,780	0,116	0,761	
2	1,41	6,310	0,890	22,890	0,094	0,667	
4	2,00	6,305	0,005	22,885	0,001	0,666	
8	2,83	6,303	0,002	22,883	0,000	0,666	
15	3,87	6,300	0,003	22,880	0,000	0,666	
30	5,48	6,300	0,000	22,880	0,000	0,666	
45	6,71	6,299	0,001	22,879	0,000	0,666	
60	7,75	6,298	0,001	22,878	0,000	0,666	
120	10,95	6,298	0,000	22,878	0,000	0,666	
180	13,42	6,298	0,000	22,878	0,000	0,666	
240	15,49	6,298	0,000	22,878	0,000	0,666	
1440	37,95	6,298	0,000	22,878	0,000	0,666	

<b>CARGA</b>	<b>25 Kpa</b>			<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	$\Delta e$	
0	0,00	6,298	0,000	22,878	0,000	0,666	1,043
0,1	0,32	5,890	0,408	22,470	0,043	0,623	
0,2	0,45	5,885	0,005	22,465	0,001	0,622	
0,5	0,71	5,880	0,005	22,460	0,001	0,622	
1	1,00	5,872	0,008	22,452	0,001	0,621	
2	1,41	5,563	0,309	22,143	0,033	0,588	
4	2,00	5,560	0,003	22,140	0,000	0,588	
8	2,83	5,855	0,295	21,845	0,031	0,557	
15	3,87	5,850	0,005	21,840	0,001	0,556	
30	5,48	5,849	0,001	21,839	0,000	0,556	
45	6,71	5,849	0,000	21,839	0,000	0,556	
60	7,75	5,845	0,004	21,835	0,000	0,556	
120	10,95	5,845	0,000	21,835	0,000	0,556	
180	13,42	5,845	0,000	21,835	0,000	0,556	
240	15,49	5,845	0,000	21,835	0,000	0,556	
1440	37,95	5,845	0,000	21,835	0,000	0,556	

<b>CARGA</b>	<b>50 Kpa</b>			<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>Δe</b>	
0	0,00	5,845	0,000	21,835	0,000	0,556	0,586
0,1	0,32	5,310	0,535	21,300	0,056	0,499	
0,2	0,45	5,302	0,008	21,292	0,001	0,498	
0,5	0,71	5,295	0,007	21,285	0,001	0,497	
1	1,00	5,285	0,010	21,275	0,001	0,496	
2	1,41	5,278	0,007	21,268	0,001	0,496	
4	2,00	5,271	0,007	21,261	0,001	0,495	
8	2,83	5,268	0,003	21,258	0,000	0,495	
15	3,87	5,262	0,006	21,252	0,001	0,494	
30	5,48	5,259	0,003	21,249	0,000	0,494	
45	6,71	5,259	0,000	21,249	0,000	0,494	
60	7,75	5,259	0,000	21,249	0,000	0,494	
120	10,95	5,259	0,000	21,249	0,000	0,494	
180	13,42	5,259	0,000	21,249	0,000	0,494	
240	15,49	5,259	0,000	21,249	0,000	0,494	
1440	37,95	5,259	0,000	21,249	0,000	0,494	

<b>CARGA</b>	<b>100 Kpa</b>			<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>Δe</b>	
0	0,00	5,259	0,000	21,249	0,000	0,494	0,487
0,1	0,32	4,840	0,419	20,830	0,044	0,449	
0,2	0,45	4,815	0,025	20,805	0,003	0,447	
0,5	0,71	4,809	0,006	20,799	0,001	0,446	
1	1,00	4,800	0,009	20,790	0,001	0,445	
2	1,41	4,790	0,010	20,780	0,001	0,444	
4	2,00	4,788	0,002	20,778	0,000	0,444	
8	2,83	4,780	0,008	20,770	0,001	0,443	
15	3,87	4,778	0,002	20,768	0,000	0,443	
30	5,48	4,772	0,006	20,762	0,001	0,442	
45	6,71	4,772	0,000	20,762	0,000	0,442	
60	7,75	4,772	0,000	20,762	0,000	0,442	
120	10,95	4,772	0,000	20,762	0,000	0,442	
180	13,42	4,772	0,000	20,762	0,000	0,442	
240	15,49	4,772	0,000	20,762	0,000	0,442	
1440	37,95	4,772	0,000	20,762	0,000	0,442	



<b>CARGA</b>	<b>200 Kpa</b>			<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	$\Delta e$	
0	0,00	4,772	0,000	20,762	0,000	0,442	0,401
0,1	0,32	4,620	0,152	20,610	0,016	0,426	
0,2	0,45	4,410	0,210	20,400	0,022	0,404	
0,5	0,71	4,405	0,005	20,395	0,001	0,403	
1	1,00	4,399	0,006	20,389	0,001	0,403	
2	1,41	4,392	0,007	20,382	0,001	0,402	
4	2,00	4,385	0,007	20,375	0,001	0,401	
8	2,83	4,381	0,004	20,371	0,000	0,401	
15	3,87	4,378	0,003	20,368	0,000	0,401	
30	5,48	4,371	0,007	20,361	0,001	0,400	
45	6,71	4,371	0,000	20,361	0,000	0,400	
60	7,75	4,371	0,000	20,361	0,000	0,400	
120	10,95	4,371	0,000	20,361	0,000	0,400	
180	13,42	4,371	0,000	20,361	0,000	0,400	
240	15,49	4,371	0,000	20,361	0,000	0,400	
1440	37,95	4,371	0,000	20,361	0,000	0,400	

---

**DADOS DA AMOSTRA 03**

---

---

**Dados do amostrador**

---

<b>Altura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>
2,50	11,25	99,40	248,50

---

---

**Parâmetros iniciais**

---

<b>Massa Seca (g)</b>	<b>Densidade seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Índice de vazios inicial</b>	<b>Grau de saturação inicial (%)</b>	<b>Gs</b>
288,92	1,16	0,0%	1,279	0,0%	2,65

---

---

<b>Leitura inicial (Antes do carregamento)</b>	<b>Leitura (início do carregamento)</b>	<b>Índice de vazios (início do carregamento)</b>
--	---	--

---

9,450	7,552	1,106
-------	-------	-------

---

---

<b>CARGA (kPa)</b>	<b>Log(s)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b>e</b>	
13	1,1	0,730	0,083	1,196
25	1,4	0,834	0,095	1,101
50	1,7	0,952	0,108	0,992
100	2,0	0,806	0,092	0,900
200	2,3	0,740	0,084	0,816

---

**LEITURAS DOS CARREGAMENTOS****AMOSTRA 03**

<b>CARGA</b>	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>13 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>		<b>DH (mm)</b>	
			<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b><math>\Delta e</math></b>		<b>e</b>
	0	0,00	8,282	0,000	25,000	0,000	1,106	0,730
	0,1	0,32	8,250	0,032	24,968	0,004	1,102	
	0,2	0,45	8,200	0,050	24,918	0,006	1,097	
	0,5	0,71	8,090	0,110	24,808	0,013	1,084	
	1	1,00	7,890	0,200	24,608	0,023	1,061	
	2	1,41	7,760	0,130	24,478	0,015	1,046	
	4	2,00	7,680	0,080	24,398	0,009	1,037	
	8	2,83	7,625	0,055	24,343	0,006	1,031	
	15	3,87	7,600	0,025	24,318	0,003	1,028	
	30	5,48	7,577	0,023	24,295	0,003	1,026	
	45	6,71	7,562	0,015	24,280	0,002	1,024	
	60	7,75	7,552	0,010	24,270	0,001	1,023	
	120	10,95	7,552	0,000	24,270	0,000	1,023	
	180	13,42	7,552	0,000	24,270	0,000	1,023	
	240	15,49	7,552	0,000	24,270	0,000	1,023	
	1440	37,95	7,552	0,000	24,270	0,000	1,023	

<b>CARGA</b>	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>25 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>		<b>DH (mm)</b>	
			<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b><math>\Delta e</math></b>		<b>e</b>
	0	0,00	7,552	0,000	24,270	0,000	1,023	0,834
	0,1	0,32	7,010	0,542	23,728	0,062	0,961	
	0,2	0,45	6,950	0,060	23,668	0,007	0,954	
	0,5	0,71	6,923	0,027	23,641	0,003	0,951	
	1	1,00	6,880	0,043	23,598	0,005	0,946	
	2	1,41	6,850	0,030	23,568	0,003	0,943	
	4	2,00	6,811	0,039	23,529	0,004	0,938	
	8	2,83	6,784	0,027	23,502	0,003	0,935	
	15	3,87	6,755	0,029	23,473	0,003	0,932	
	30	5,48	6,718	0,037	23,436	0,004	0,928	
	45	6,71	6,718	0,000	23,436	0,000	0,928	
	60	7,75	6,718	0,000	23,436	0,000	0,928	
	120	10,95	6,718	0,000	23,436	0,000	0,928	
	180	13,42	6,718	0,000	23,436	0,000	0,928	
	240	15,49	6,718	0,000	23,436	0,000	0,928	
	1440	37,95	6,718	0,000	23,436	0,000	0,928	

<b>CARGA</b>	<b>50 Kpa</b>			<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	$\Delta e$	
0	0,00	6,718	0,000	23,436	0,000	0,928	0,952
0,1	0,32	6,100	0,618	22,818	0,070	0,857	
0,2	0,45	6,010	0,090	22,728	0,010	0,847	
0,5	0,71	5,980	0,030	22,698	0,003	0,844	
1	1,00	5,940	0,040	22,658	0,005	0,839	
2	1,41	5,892	0,048	22,610	0,005	0,834	
4	2,00	5,852	0,040	22,570	0,005	0,829	
8	2,83	5,821	0,031	22,539	0,004	0,826	
15	3,87	5,794	0,027	22,512	0,003	0,822	
30	5,48	5,771	0,023	22,489	0,003	0,820	
45	6,71	5,766	0,005	22,484	0,001	0,819	
60	7,75	5,766	0,000	22,484	0,000	0,819	
120	10,95	5,766	0,000	22,484	0,000	0,819	
180	13,42	5,766	0,000	22,484	0,000	0,819	
240	15,49	5,766	0,000	22,484	0,000	0,819	
1440	37,95	5,766	0,000	22,484	0,000	0,819	

<b>CARGA</b>	<b>100 Kpa</b>			<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	$\Delta e$	
0	0,00	5,766	0,000	22,484	0,000	0,819	0,806
0,1	0,32	5,200	0,566	21,918	0,064	0,755	
0,2	0,45	5,150	0,050	21,868	0,006	0,749	
0,5	0,71	5,120	0,030	21,838	0,003	0,746	
1	1,00	5,087	0,033	21,805	0,004	0,742	
2	1,41	5,049	0,038	21,767	0,004	0,738	
4	2,00	5,018	0,031	21,736	0,004	0,734	
8	2,83	4,993	0,025	21,711	0,003	0,731	
15	3,87	4,973	0,020	21,691	0,002	0,729	
30	5,48	4,960	0,013	21,678	0,001	0,727	
45	6,71	4,960	0,000	21,678	0,000	0,727	
60	7,75	4,960	0,000	21,678	0,000	0,727	
120	10,95	4,960	0,000	21,678	0,000	0,727	
180	13,42	4,960	0,000	21,678	0,000	0,727	
240	15,49	4,960	0,000	21,678	0,000	0,727	
1440	37,95	4,960	0,000	21,678	0,000	0,727	

<b>CARGA</b>	<b>200 Kpa</b>			<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	$\Delta e$	
0	0,00	4,960	0,000	21,678	0,000	0,727	0,740
0,1	0,32	4,410	0,550	21,128	0,063	0,665	
0,2	0,45	4,370	0,040	21,088	0,005	0,660	
0,5	0,71	4,350	0,020	21,068	0,002	0,658	
1	1,00	4,328	0,022	21,046	0,003	0,655	
2	1,41	4,300	0,028	21,018	0,003	0,652	
4	2,00	4,280	0,020	20,998	0,002	0,650	
8	2,83	4,253	0,027	20,971	0,003	0,647	
15	3,87	4,235	0,018	20,953	0,002	0,645	
30	5,48	4,220	0,015	20,938	0,002	0,643	
45	6,71	4,220	0,000	20,938	0,000	0,643	
60	7,75	4,220	0,000	20,938	0,000	0,643	
120	10,95	4,220	0,000	20,938	0,000	0,643	
180	13,42	4,220	0,000	20,938	0,000	0,643	
240	15,49	4,220	0,000	20,938	0,000	0,643	
1440	37,95	4,220	0,000	20,938	0,000	0,643	

---

**DADOS DA AMOSTRA 04**

---

---

**Dados do amostrador**

---

<b>Altura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>
2,50	11,25	99,40	248,50

---

---

**Parâmetros iniciais**

---

<b>Massa Seca (g)</b>	<b>Densidade seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Índice de vazios inicial</b>	<b>Grau de saturação inicial (%)</b>	<b>Gs</b>
368,21	1,48	0,0%	0,795	0,0%	2,66

---

---

<b>Leitura inicial (Antes do carregamento)</b>	<b>Leitura (início do carregamento)</b>	<b>Índice de vazios (início do carregamento)</b>
--	---	--

---

8,598	7,023	0,682
-------	-------	-------

---

---

<b>CARGA (kPa)</b>	<b>Log(s)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b>e</b>	
13	1,1	0,316	0,028	0,767
25	1,4	0,543	0,049	0,718
50	1,7	0,251	0,023	0,695
100	2,0	0,197	0,018	0,678
200	2,3	0,181	0,016	0,661

---

**LEITURAS DOS CARREGAMENTOS****AMOSTRA 04**

<b>CARGA</b>	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>13 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>		<b>DH (mm)</b>	
			<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b><math>\Delta e</math></b>		<b>e</b>
	0	0,00	7,339	0,000	25,000	0,000	0,682	0,316
	0,1	0,32	7,260	0,079	24,921	0,007	0,675	
	0,2	0,45	7,150	0,110	24,811	0,010	0,665	
	0,5	0,71	7,110	0,040	24,771	0,004	0,661	
	1	1,00	7,050	0,060	24,711	0,005	0,656	
	2	1,41	7,030	0,020	24,691	0,002	0,654	
	4	2,00	7,030	0,000	24,691	0,000	0,654	
	8	2,83	7,029	0,001	24,690	0,000	0,654	
	15	3,87	7,029	0,000	24,690	0,000	0,654	
	30	5,48	7,025	0,004	24,686	0,000	0,654	
	45	6,71	7,023	0,002	24,684	0,000	0,654	
	60	7,75	7,023	0,000	24,684	0,000	0,654	
	120	10,95	7,023	0,000	24,684	0,000	0,654	
	180	13,42	7,023	0,000	24,684	0,000	0,654	
	240	15,49	7,023	0,000	24,684	0,000	0,654	
	1440	37,95	7,023	0,000	24,684	0,000	0,654	

<b>CARGA</b>	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>25 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>		<b>DH (mm)</b>	
			<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b><math>\Delta e</math></b>		<b>e</b>
	0	0,00	7,023	0,000	24,684	0,000	0,654	0,543
	0,1	0,32	6,515	0,508	24,176	0,046	0,608	
	0,2	0,45	6,510	0,005	24,171	0,000	0,608	
	0,5	0,71	6,508	0,002	24,169	0,000	0,607	
	1	1,00	6,500	0,008	24,161	0,001	0,607	
	2	1,41	6,482	0,018	24,143	0,002	0,605	
	4	2,00	6,480	0,002	24,141	0,000	0,605	
	8	2,83	6,480	0,000	24,141	0,000	0,605	
	15	3,87	6,480	0,000	24,141	0,000	0,605	
	30	5,48	6,480	0,000	24,141	0,000	0,605	
	45	6,71	6,480	0,000	24,141	0,000	0,605	
	60	7,75	6,480	0,000	24,141	0,000	0,605	
	120	10,95	6,480	0,000	24,141	0,000	0,605	
	180	13,42	6,480	0,000	24,141	0,000	0,605	
	240	15,49	6,480	0,000	24,141	0,000	0,605	
	1440	37,95	6,480	0,000	24,141	0,000	0,605	

CARGA Tempo	Raiz (t)	50 Kpa		COM INUNDAÇÃO			DH (mm)
		Leitura	DH (mm)	H (mm)	$\Delta e$	e	
0	0,00	6,480	0,000	24,141	0,000	0,605	0,251
0,1	0,32	6,280	0,200	23,941	0,018	0,587	
0,2	0,45	6,272	0,008	23,933	0,001	0,586	
0,5	0,71	6,270	0,002	23,931	0,000	0,586	
1	1,00	6,268	0,002	23,929	0,000	0,586	
2	1,41	6,265	0,003	23,926	0,000	0,586	
4	2,00	6,262	0,003	23,923	0,000	0,585	
8	2,83	6,260	0,002	23,921	0,000	0,585	
15	3,87	6,259	0,001	23,920	0,000	0,585	
30	5,48	6,229	0,030	23,890	0,003	0,582	
45	6,71	6,229	0,000	23,890	0,000	0,582	
60	7,75	6,229	0,000	23,890	0,000	0,582	
120	10,95	6,229	0,000	23,890	0,000	0,582	
180	13,42	6,229	0,000	23,890	0,000	0,582	
240	15,49	6,229	0,000	23,890	0,000	0,582	
1440	37,95	6,229	0,000	23,890	0,000	0,582	

CARGA Tempo	Raiz (t)	100 Kpa		COM INUNDAÇÃO			DH (mm)
		Leitura	DH (mm)	H (mm)	$\Delta e$	e	
0	0,00	6,229	0,000	23,890	0,000	0,582	0,197
0,1	0,32	6,060	0,169	23,721	0,015	0,567	
0,2	0,45	6,058	0,002	23,719	0,000	0,567	
0,5	0,71	6,057	0,001	23,718	0,000	0,567	
1	1,00	6,052	0,005	23,713	0,000	0,566	
2	1,41	6,049	0,003	23,710	0,000	0,566	
4	2,00	6,044	0,005	23,705	0,000	0,566	
8	2,83	6,041	0,003	23,702	0,000	0,565	
15	3,87	6,039	0,002	23,700	0,000	0,565	
30	5,48	6,032	0,007	23,693	0,001	0,565	
45	6,71	6,032	0,000	23,693	0,000	0,565	
60	7,75	6,032	0,000	23,693	0,000	0,565	
120	10,95	6,032	0,000	23,693	0,000	0,565	
180	13,42	6,032	0,000	23,693	0,000	0,565	
240	15,49	6,032	0,000	23,693	0,000	0,565	
1440	37,95	6,032	0,000	23,693	0,000	0,565	



<b>CARGA</b>		<b>200 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>Δe</b>	<b>e</b>	
0	0,00	6,032	0,000	23,693	0,000	0,565	0,181
0,1	0,32	5,880	0,152	23,541	0,014	0,551	
0,2	0,45	5,875	0,005	23,536	0,000	0,551	
0,5	0,71	5,872	0,003	23,533	0,000	0,550	
1	1,00	5,869	0,003	23,530	0,000	0,550	
2	1,41	5,865	0,004	23,526	0,000	0,550	
4	2,00	5,861	0,004	23,522	0,000	0,549	
8	2,83	5,860	0,001	23,521	0,000	0,549	
15	3,87	5,855	0,005	23,516	0,000	0,549	
30	5,48	5,851	0,004	23,512	0,000	0,548	
45	6,71	5,851	0,000	23,512	0,000	0,548	
60	7,75	5,851	0,000	23,512	0,000	0,548	
120	10,95	5,851	0,000	23,512	0,000	0,548	
180	13,42	5,851	0,000	23,512	0,000	0,548	
240	15,49	5,851	0,000	23,512	0,000	0,548	
1440	37,95	5,851	0,000	23,512	0,000	0,548	

---

**DADOS DA AMOSTRA 05**

---

---

**Dados do amostrador**

---

Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )
2,50	11,25	99,40	248,50

---

---

**Parâmetros iniciais**

---

Massa Seca (g)	Densidade seca (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Índice de vazios inicial	Grau de saturação inicial (%)	Gs
367,73	1,48	0,0%	0,798	0,0%	2,66

---

---

Leitura inicial (Antes do carregamento)	Leitura (início do carregamento)	Índice de vazios (início do carregamento)
8,800	8,663	0,788

---

---

CARGA (kPa)	Log(s)	$\Delta H$ (mm)	e	
13	1,1	0,045	0,004	0,794
25	1,4	0,124	0,011	0,783
50	1,7	0,060	0,005	0,777
100	2,0	0,104	0,009	0,768
200	2,3	0,166	0,015	0,753

---

**LEITURAS DOS CARREGAMENTOS****AMOSTRA 05**

<b>CARGA</b>		<b>13 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>Δe</b>	<b>e</b>	
0	0,00	8,708	0,000	25,000	0,000	0,788	0,045
0,1	0,32	8,690	0,018	24,982	0,002	0,787	
0,2	0,45	8,680	0,010	24,972	0,001	0,786	
0,5	0,71	8,678	0,002	24,970	0,000	0,785	
1	1,00	8,675	0,003	24,967	0,000	0,785	
2	1,41	8,672	0,003	24,964	0,000	0,785	
4	2,00	8,672	0,000	24,964	0,000	0,785	
8	2,83	8,670	0,002	24,962	0,000	0,785	
15	3,87	8,669	0,001	24,961	0,000	0,785	
30	5,48	8,668	0,001	24,960	0,000	0,785	
45	6,71	8,667	0,001	24,959	0,000	0,784	
60	7,75	8,663	0,004	24,955	0,000	0,784	
120	10,95	8,663	0,000	24,955	0,000	0,784	
180	13,42	8,663	0,000	24,955	0,000	0,784	
240	15,49	8,663	0,000	24,955	0,000	0,784	
1440	37,95	8,663	0,000	24,955	0,000	0,784	

<b>CARGA</b>		<b>25 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>Δe</b>	<b>e</b>	
0	0,00	8,663	0,000	24,955	0,000	0,784	0,124
0,1	0,32	8,610	0,053	24,902	0,005	0,779	
0,2	0,45	8,609	0,001	24,901	0,000	0,779	
0,5	0,71	8,607	0,002	24,899	0,000	0,779	
1	1,00	8,605	0,002	24,897	0,000	0,779	
2	1,41	8,600	0,005	24,892	0,000	0,778	
4	2,00	8,540	0,060	24,832	0,005	0,773	
8	2,83	8,539	0,001	24,831	0,000	0,773	
15	3,87	8,539	0,000	24,831	0,000	0,773	
30	5,48	8,539	0,000	24,831	0,000	0,773	
45	6,71	8,539	0,000	24,831	0,000	0,773	
60	7,75	8,539	0,000	24,831	0,000	0,773	

120	10,95	8,539	0,000	24,831	0,000	0,773
180	13,42	8,539	0,000	24,831	0,000	0,773
240	15,49	8,539	0,000	24,831	0,000	0,773
1440	37,95	8,539	0,000	24,831	0,000	0,773

CARGA Tempo	50 Kpa			COM INUNDAÇÃO			DH (mm)
	Raiz (t)	Leitura	DH (mm)	H (mm)	$\Delta e$	e	
0	0,00	8,539	0,000	24,831	0,000	0,773	0,060
0,1	0,32	8,490	0,049	24,782	0,004	0,769	
0,2	0,45	8,489	0,001	24,781	0,000	0,768	
0,5	0,71	8,488	0,001	24,780	0,000	0,768	
1	1,00	8,486	0,002	24,778	0,000	0,768	
2	1,41	8,483	0,003	24,775	0,000	0,768	
4	2,00	8,482	0,001	24,774	0,000	0,768	
8	2,83	8,481	0,001	24,773	0,000	0,768	
15	3,87	8,479	0,002	24,771	0,000	0,768	
30	5,48	8,479	0,000	24,771	0,000	0,768	
45	6,71	8,479	0,000	24,771	0,000	0,768	
60	7,75	8,479	0,000	24,771	0,000	0,768	
120	10,95	8,479	0,000	24,771	0,000	0,768	
180	13,42	8,479	0,000	24,771	0,000	0,768	
240	15,49	8,479	0,000	24,771	0,000	0,768	
1440	37,95	8,479	0,000	24,771	0,000	0,768	

CARGA Tempo	100 Kpa			COM INUNDAÇÃO			DH (mm)
	Raiz (t)	Leitura	DH (mm)	H (mm)	$\Delta e$	e	
0	0,00	8,479	0,000	24,771	0,000	0,768	0,104
0,1	0,32	8,390	0,089	24,682	0,008	0,760	
0,2	0,45	8,388	0,002	24,680	0,000	0,759	
0,5	0,71	8,385	0,003	24,677	0,000	0,759	
1	1,00	8,382	0,003	24,674	0,000	0,759	
2	1,41	8,381	0,001	24,673	0,000	0,759	
4	2,00	8,379	0,002	24,671	0,000	0,759	
8	2,83	8,376	0,003	24,668	0,000	0,758	
15	3,87	8,375	0,001	24,667	0,000	0,758	
30	5,48	8,375	0,000	24,667	0,000	0,758	
45	6,71	8,375	0,000	24,667	0,000	0,758	
60	7,75	8,375	0,000	24,667	0,000	0,758	
120	10,95	8,375	0,000	24,667	0,000	0,758	
180	13,42	8,375	0,000	24,667	0,000	0,758	

240	15,49	8,375	0,000	24,667	0,000	0,758
1440	37,95	8,375	0,000	24,667	0,000	0,758

CARGA Tempo	200 Kpa Raiz (t)	Leitura	DH (mm)	COM INUNDAÇÃO			DH (mm)
				H (mm)	$\Delta e$	e	
0	0,00	8,375	0,000	24,667	0,000	0,758	0,166
0,1	0,32	8,249	0,126	24,541	0,011	0,747	
0,2	0,45	8,248	0,001	24,540	0,000	0,747	
0,5	0,71	8,244	0,004	24,536	0,000	0,746	
1	1,00	8,241	0,003	24,533	0,000	0,746	
2	1,41	8,240	0,001	24,532	0,000	0,746	
4	2,00	8,238	0,002	24,530	0,000	0,746	
8	2,83	8,233	0,005	24,525	0,000	0,745	
15	3,87	8,231	0,002	24,523	0,000	0,745	
30	5,48	8,209	0,022	24,501	0,002	0,743	
45	6,71	8,209	0,000	24,501	0,000	0,743	
60	7,75	8,209	0,000	24,501	0,000	0,743	
120	10,95	8,209	0,000	24,501	0,000	0,743	
180	13,42	8,209	0,000	24,501	0,000	0,743	
240	15,49	8,209	0,000	24,501	0,000	0,743	
1440	37,95	8,209	0,000	24,501	0,000	0,743	

---

**DADOS DA AMOSTRA 06**

---

---

**Dados do amostrador**

---

<b>Altura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>
2,50	11,25	99,40	248,50

---

---

**Parâmetros iniciais**

---

<b>Massa Seca (g)</b>	<b>Densidade seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Índice de vazios inicial</b>	<b>Grau de saturação inicial (%)</b>	<b>Gs</b>
357,74	1,44	0,0%	0,876	0,0%	2,70

---

---

<b>Leitura inicial (Antes do carregamento)</b>	<b>Leitura (início do carregamento)</b>	<b>Índice de vazios (início do carregamento)</b>
--	---	--

---

8,569	5,730	0,663
-------	-------	-------

---

---

<b>CARGA (kPa)</b>	<b>Log(s)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b>e</b>	
13	1,1	0,205	0,019	0,644
25	1,4	0,310	0,029	0,615
50	1,7	0,382	0,036	0,579
100	2,0	0,181	0,017	0,562
200	2,3	0,210	0,020	0,542

---

**LEITURAS DOS CARREGAMENTOS****AMOSTRA 06**

<b>CARGA</b>		<b>13 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>Δe</b>	<b>e</b>	
0	0,00	5,730	0,000	25,000	0,000	0,663	0,205
0,1	0,32	5,660	0,070	24,930	0,007	0,656	
0,2	0,45	5,590	0,070	24,860	0,007	0,650	
0,5	0,71	5,575	0,015	24,845	0,001	0,648	
1	1,00	5,535	0,040	24,805	0,004	0,645	
2	1,41	5,535	0,000	24,805	0,000	0,645	
4	2,00	5,535	0,000	24,805	0,000	0,645	
8	2,83	5,532	0,003	24,802	0,000	0,644	
15	3,87	5,531	0,001	24,801	0,000	0,644	
30	5,48	5,531	0,000	24,801	0,000	0,644	
45	6,71	5,530	0,001	24,800	0,000	0,644	
60	7,75	5,529	0,001	24,799	0,000	0,644	
120	10,95	5,527	0,002	24,797	0,000	0,644	
180	13,42	5,525	0,002	24,795	0,000	0,644	
240	15,49	5,525	0,000	24,795	0,000	0,644	
1440	37,95	5,525	0,000	24,795	0,000	0,644	

<b>CARGA</b>		<b>25 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>			<b>DH (mm)</b>
<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>Δe</b>	<b>e</b>	
0	0,00	5,525	0,000	24,795	0,000	0,644	0,310
0,1	0,32	5,240	0,285	24,510	0,027	0,617	
0,2	0,45	5,230	0,010	24,500	0,001	0,616	
0,5	0,71	5,225	0,005	24,495	0,000	0,616	
1	1,00	5,223	0,002	24,493	0,000	0,615	
2	1,41	5,221	0,002	24,491	0,000	0,615	
4	2,00	5,221	0,000	24,491	0,000	0,615	
8	2,83	5,221	0,000	24,491	0,000	0,615	
15	3,87	5,215	0,006	24,485	0,001	0,615	
30	5,48	5,215	0,000	24,485	0,000	0,615	
45	6,71	5,215	0,000	24,485	0,000	0,615	
60	7,75	5,215	0,000	24,485	0,000	0,615	

120	10,95	5,215	0,000	24,485	0,000	0,615
180	13,42	5,215	0,000	24,485	0,000	0,615
240	15,49	5,215	0,000	24,485	0,000	0,615
1440	37,95	5,215	0,000	24,485	0,000	0,615

CARGA Tempo	Raiz (t)	50 Kpa		COM INUNDAÇÃO			DH (mm)
		Leitura	DH (mm)	H (mm)	Δe	e	
0	0,00	5,215	0,000	24,485	0,000	0,615	0,382
0,1	0,32	5,020	0,195	24,290	0,018	0,596	
0,2	0,45	5,010	0,010	24,280	0,001	0,595	
0,5	0,71	5,010	0,000	24,280	0,000	0,595	
1	1,00	5,003	0,007	24,273	0,001	0,595	
2	1,41	5,000	0,003	24,270	0,000	0,595	
4	2,00	4,998	0,002	24,268	0,000	0,594	
8	2,83	4,993	0,005	24,263	0,000	0,594	
15	3,87	4,991	0,002	24,261	0,000	0,594	
30	5,48	4,833	0,158	24,103	0,015	0,579	
45	6,71	4,833	0,000	24,103	0,000	0,579	
60	7,75	4,833	0,000	24,103	0,000	0,579	
120	10,95	4,833	0,000	24,103	0,000	0,579	
180	13,42	4,833	0,000	24,103	0,000	0,579	
240	15,49	4,833	0,000	24,103	0,000	0,579	
1440	37,95	4,833	0,000	24,103	0,000	0,579	

CARGA Tempo	Raiz (t)	100 Kpa		COM INUNDAÇÃO			DH (mm)
		Leitura	DH (mm)	H (mm)	Δe	e	
0	0,00	4,833	0,000	24,103	0,000	0,579	0,181
0,1	0,32	4,673	0,160	23,943	0,015	0,564	
0,2	0,45	4,671	0,002	23,941	0,000	0,564	
0,5	0,71	4,669	0,002	23,939	0,000	0,563	
1	1,00	4,668	0,001	23,938	0,000	0,563	
2	1,41	4,662	0,006	23,932	0,001	0,563	
4	2,00	4,660	0,002	23,930	0,000	0,563	
8	2,83	4,658	0,002	23,928	0,000	0,562	
15	3,87	4,655	0,003	23,925	0,000	0,562	
30	5,48	4,652	0,003	23,922	0,000	0,562	
45	6,71	4,652	0,000	23,922	0,000	0,562	
60	7,75	4,652	0,000	23,922	0,000	0,562	
120	10,95	4,652	0,000	23,922	0,000	0,562	
180	13,42	4,652	0,000	23,922	0,000	0,562	



240	15,49	4,652	0,000	23,922	0,000	0,562
1440	37,95	4,652	0,000	23,922	0,000	0,562

CARGA Tempo	200 Kpa Raiz (t)	COM INUNDAÇÃO					DH (mm)
		Leitura	DH (mm)	H (mm)	$\Delta e$	e	
0	0,00	4,652	0,000	23,922	0,000	0,562	0,210
0,1	0,32	4,470	0,182	23,740	0,017	0,545	
0,2	0,45	4,460	0,010	23,730	0,001	0,544	
0,5	0,71	4,460	0,000	23,730	0,000	0,544	
1	1,00	4,459	0,001	23,729	0,000	0,544	
2	1,41	4,455	0,004	23,725	0,000	0,543	
4	2,00	4,451	0,004	23,721	0,000	0,543	
8	2,83	4,449	0,002	23,719	0,000	0,543	
15	3,87	4,448	0,001	23,718	0,000	0,543	
30	5,48	4,442	0,006	23,712	0,001	0,542	
45	6,71	4,442	0,000	23,712	0,000	0,542	
60	7,75	4,442	0,000	23,712	0,000	0,542	
120	10,95	4,442	0,000	23,712	0,000	0,542	
180	13,42	4,442	0,000	23,712	0,000	0,542	
240	15,49	4,442	0,000	23,712	0,000	0,542	
1440	37,95	4,442	0,000	23,712	0,000	0,542	

---

**DADOS DA AMOSTRA 07**

---

---

**Dados do amostrador**

---

<b>Altura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>
2,50	11,25	99,40	248,50

---

---

**Parâmetros iniciais**

---

<b>Massa Seca (g)</b>	<b>Densidade seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Índice de vazios inicial</b>	<b>Grau de saturação inicial (%)</b>	<b>Gs</b>
353,84	1,42	0,0%	0,875	0,0%	2,67

---

---

<b>Leitura inicial (Antes do carregamento)</b>	<b>Leitura (início do carregamento)</b>	<b>Índice de vazios (início do carregamento)</b>
--	---	--

---

7,700	7,388	0,852
-------	-------	-------

---

---

<b>CARGA (kPa)</b>	<b>Log(s)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b>e</b>	
13	1,1	0,134	0,013	0,839
25	1,4	0,109	0,010	0,829
50	1,7	0,108	0,010	0,819
100	2,0	0,151	0,014	0,805
200	2,3	0,188	0,018	0,787

---

**LEITURAS DOS CARREGAMENTOS****AMOSTRA 07**

<b>CARGA</b>	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>13 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>		<b>DH (mm)</b>	
			<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b><math>\Delta e</math></b>		<b>e</b>
	0	0,00	7,508	0,000	25,000	0,000	0,852	0,134
	0,1	0,32	7,500	0,008	24,992	0,001	0,851	
	0,2	0,45	7,490	0,010	24,982	0,001	0,850	
	0,5	0,71	7,488	0,002	24,980	0,000	0,850	
	1	1,00	7,450	0,038	24,942	0,004	0,846	
	2	1,41	7,430	0,020	24,922	0,002	0,844	
	4	2,00	7,400	0,030	24,892	0,003	0,841	
	8	2,83	7,395	0,005	24,887	0,000	0,841	
	15	3,87	7,391	0,004	24,883	0,000	0,841	
	30	5,48	7,382	0,009	24,874	0,001	0,840	
	45	6,71	7,389	0,007	24,867	0,001	0,839	
	60	7,75	7,388	0,001	24,866	0,000	0,839	
	120	10,95	7,388	0,000	24,866	0,000	0,839	
	180	13,42	7,388	0,000	24,866	0,000	0,839	
	240	15,49	7,388	0,000	24,866	0,000	0,839	
	1440	37,95	7,388	0,000	24,866	0,000	0,839	

<b>CARGA</b>	<b>Tempo</b>	<b>Raiz (t)</b>	<b>25 Kpa</b>		<b>COM INUNDAÇÃO</b>		<b>DH (mm)</b>	
			<b>Leitura</b>	<b>DH (mm)</b>	<b>H (mm)</b>	<b><math>\Delta e</math></b>		<b>e</b>
	0	0,00	7,388	0,000	24,866	0,000	0,839	0,109
	0,1	0,32	7,319	0,069	24,797	0,006	0,833	
	0,2	0,45	7,315	0,004	24,793	0,000	0,832	
	0,5	0,71	7,312	0,003	24,790	0,000	0,832	
	1	1,00	7,310	0,002	24,788	0,000	0,832	
	2	1,41	7,307	0,003	24,785	0,000	0,831	
	4	2,00	7,305	0,002	24,783	0,000	0,831	
	8	2,83	7,302	0,003	24,780	0,000	0,831	

15	3,87	7,300	0,002	24,778	0,000	0,831
30	5,48	7,279	0,021	24,757	0,002	0,829
45	6,71	7,279	0,000	24,757	0,000	0,829
60	7,75	7,279	0,000	24,757	0,000	0,829
120	10,95	7,279	0,000	24,757	0,000	0,829
180	13,42	7,279	0,000	24,757	0,000	0,829
240	15,49	7,279	0,000	24,757	0,000	0,829
1440	37,95	7,279	0,000	24,757	0,000	0,829

CARGA Tempo	50 Kpa			COM INUNDAÇÃO			DH (mm)
	Raiz (t)	Leitura	DH (mm)	H (mm)	$\Delta e$	e	
0	0,00	7,279	0,000	24,757	0,000	0,829	0,108
0,1	0,32	7,198	0,081	24,676	0,008	0,821	
0,2	0,45	7,191	0,007	24,669	0,001	0,821	
0,5	0,71	7,188	0,003	24,666	0,000	0,820	
1	1,00	7,185	0,003	24,663	0,000	0,820	
2	1,41	7,181	0,004	24,659	0,000	0,820	
4	2,00	7,178	0,003	24,656	0,000	0,819	
8	2,83	7,176	0,002	24,654	0,000	0,819	
15	3,87	7,172	0,004	24,650	0,000	0,819	
30	5,48	7,171	0,001	24,649	0,000	0,819	
45	6,71	7,171	0,000	24,649	0,000	0,819	
60	7,75	7,171	0,000	24,649	0,000	0,819	
120	10,95	7,171	0,000	24,649	0,000	0,819	
180	13,42	7,171	0,000	24,649	0,000	0,819	
240	15,49	7,171	0,000	24,649	0,000	0,819	
1440	37,95	7,171	0,000	24,649	0,000	0,819	

CARGA Tempo	100 Kpa			COM INUNDAÇÃO			DH (mm)
	Raiz (t)	Leitura	DH (mm)	H (mm)	$\Delta e$	e	
0	0,00	7,171	0,000	24,649	0,000	0,819	0,151
0,1	0,32	7,048	0,123	24,526	0,012	0,807	
0,2	0,45	7,041	0,007	24,519	0,001	0,807	
0,5	0,71	7,038	0,003	24,516	0,000	0,806	
1	1,00	7,032	0,006	24,510	0,001	0,806	
2	1,41	7,031	0,001	24,509	0,000	0,806	
4	2,00	7,028	0,003	24,506	0,000	0,805	
8	2,83	7,025	0,003	24,503	0,000	0,805	
15	3,87	7,021	0,004	24,499	0,000	0,805	

30	5,48	7,020	0,001	24,498	0,000	0,805
45	6,71	7,020	0,000	24,498	0,000	0,805
60	7,75	7,020	0,000	24,498	0,000	0,805
120	10,95	7,020	0,000	24,498	0,000	0,805
180	13,42	7,020	0,000	24,498	0,000	0,805
240	15,49	7,020	0,000	24,498	0,000	0,805
1440	37,95	7,020	0,000	24,498	0,000	0,805

CARGA Tempo	200 Kpa			COM INUNDAÇÃO			DH (mm)
	Raiz (t)	Leitura	DH (mm)	H (mm)	$\Delta e$	e	
0	0,00	7,020	0,000	24,498	0,000	0,805	0,188
0,1	0,32	6,860	0,160	24,338	0,015	0,790	
0,2	0,45	6,857	0,003	24,335	0,000	0,789	
0,5	0,71	6,852	0,005	24,330	0,000	0,789	
1	1,00	6,851	0,001	24,329	0,000	0,789	
2	1,41	6,848	0,003	24,326	0,000	0,788	
4	2,00	6,842	0,006	24,320	0,001	0,788	
8	2,83	6,839	0,003	24,317	0,000	0,788	
15	3,87	6,837	0,002	24,315	0,000	0,787	
30	5,48	6,832	0,005	24,310	0,000	0,787	
45	6,71	6,832	0,000	24,310	0,000	0,787	
60	7,75	6,832	0,000	24,310	0,000	0,787	
120	10,95	6,832	0,000	24,310	0,000	0,787	
180	13,42	6,832	0,000	24,310	0,000	0,787	
240	15,49	6,832	0,000	24,310	0,000	0,787	
1440	37,95	6,832	0,000	24,310	0,000	0,787	

**APÊNDICE E – RESULTADO DOS ENSAIOS ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO E MÍNIMO**

<b>ANEL ADENSAMENTO</b>			
<b>DIÂMETRO (cm)</b>	<b>ALTURA (cm)</b>	<b>ÁREA (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>VOLUME (cm<sup>3</sup>)</b>
11,25	2,5	99,40	248,50

<b>DENSIDADE MÍNIMA</b>						
<b>AMOSTRA</b>	<b>P-SOLO(g)</b>	<b>Vol-cil (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Pmín(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>P-SOLO anel(g)</b>	<b>Gs</b>	<b>eMÁX</b>
<b>AM1</b>	1418,61		1,423	353,59	2,66	0,869
<b>AM2</b>	1269,60		1,273	316,45	2,69	1,112
<b>AM3</b>	1159,16		1,163	288,92	2,65	1,279
<b>AM4</b>	1477,24	997	1,482	368,21	2,66	0,795
<b>AM5</b>	1475,34		1,480	367,73	2,66	0,798
<b>AM6</b>	1435,26		1,440	357,74	2,70	0,876
<b>AM7</b>	1419,60		1,424	353,84	2,67	0,875

<b>DENSIDADE MÁXIMA</b>						
<b>AMOSTRA</b>	<b>P-SOLO(g)</b>	<b>Vol-cil (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Pmáx(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gs</b>	<b>eMÍN</b>	
<b>AM1</b>	1602,94		1,608	2,66	0,654	
<b>AM2</b>	1573,23	997	1,578	2,69	0,705	
<b>AM3</b>	1421,30		1,426	2,65	0,859	

<b>AM4</b>	1668,13	1,673	2,66	0,590
<b>AM5</b>	1669,65	1,675	2,66	0,588
<b>AM6</b>	1633,35	1,638	2,70	0,648
<b>AM7</b>	1587,52	1,592	2,67	0,677

**APÊNDICE F – RESULTADO DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE**

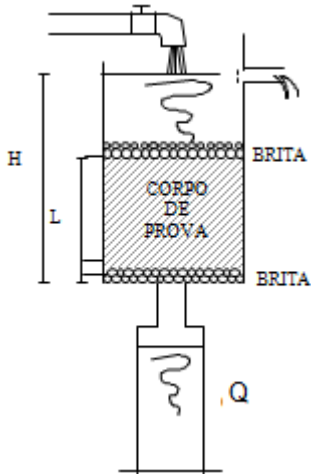
<b>PERMEABILIDADE (cm/s)</b>							
<b>PRESSÃO (Kpa)</b>	<b>AM1</b>	<b>AM2</b>	<b>AM3</b>	<b>AM4</b>	<b>AM5</b>	<b>AM6</b>	<b>AM7</b>
<b>13</b>	3,02E-03	3,21E-04	1,87E-03	0,00E+00	2,79E-03	0,00E+00	2,68E-03
<b>25</b>	2,96E-03	1,82E-04	1,08E-03	2,58E-03	2,73E-03	3,12E-04	2,61E-03
<b>50</b>	2,96E-03	9,17E-05	5,28E-04	2,51E-03	2,70E-03	5,92E-04	2,58E-03
<b>100</b>	2,91E-03	4,63E-05	2,12E-04	2,41E-03	2,65E-03	6,18E-04	2,54E-03
<b>200</b>	2,83E-03	2,95E-05	8,44E-05	2,33E-03	2,59E-03	6,67E-04	2,51E-03

**APÊNDICE G – RESULTADO DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE PARA A  
AMOSTRA DE VALIDAÇÃO**



## ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA CONSTANTE

AMOSTRA DE VALIDAÇÃO EM SEU ESTADO MAIS FOFO



Q - VOLUME DE ÁGUA MEDIDO NA PROVETA

L - ALTURA DO CORPO DE PROVA

A - ÁREA DO CORPO DE PROVA

H - CARGA HIDRÁULICA

M - MASSA SECA

$\rho$  - MASSA ESPECÍFICA SECA

$\delta$  - DENSIDADE REAL

e - ÍNDICE DE VAZIOS

T - TEMPERATURA DO ENSAIO

Fc - FATOR DE CORREÇÃO

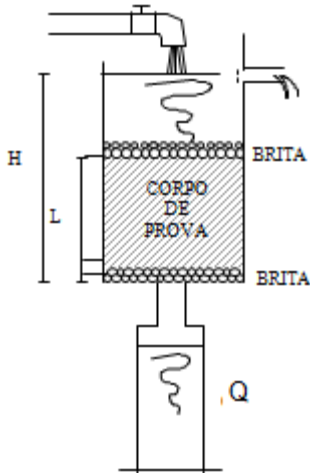
	cm <sup>3</sup>
<b>5,60</b>	cm
<b>194,33</b>	cm <sup>2</sup>
<b>89,50</b>	cm
<b>1735,00</b>	g
<b>1,594</b>	g/cm <sup>3</sup>
<b>2,650</b>	
<b>0,662</b>	
<b>25</b>	°C
<b>0,828</b>	

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \quad (\text{cm/s})$$

LEITURA N°	ALTURA L (cm)	Q (cm <sup>3</sup> )	t (s)	K (cm/s)
1	5,6	708	120	1,6E-03
2	5,6	701	120	1,6E-03
3	5,6	699	120	1,6E-03
4	5,6	699	120	1,6E-03
MÉDIA				1,56E-03

## ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA CONSTANTE

AMOSTRA DE VALIDAÇÃO EM ESTADO DE COMPACTAÇÃO INTERMEDIÁRIO



Q - VOLUME DE ÁGUA MEDIDO NA PROVETA

L - ALTURA DO CORPO DE PROVA

A - ÁREA DO CORPO DE PROVA

H - CARGA HIDRÁULICA

M - MASSA SECA

$\rho$  - MASSA ESPECÍFICA SECA

$\delta$  - DENSIDADE REAL

e - ÍNDICE DE VAZIOS

T - TEMPERATURA DO ENSAIO

Fc - FATOR DE CORREÇÃO

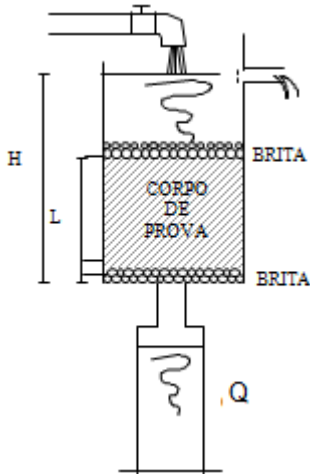
	cm <sup>3</sup>
<b>5,20</b>	cm
<b>194,33</b>	cm <sup>2</sup>
<b>89,50</b>	cm
<b>1735,00</b>	g
<b>1,717</b>	g/cm <sup>3</sup>
<b>2,650</b>	
<b>0,543</b>	
<b>25</b>	°C
<b>0,828</b>	

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \quad (\text{cm/s})$$

LEITURA N°	ALTURA L (cm)	Q (cm <sup>3</sup> )	t (s)	K (cm/s)
1	5,2	458	120	9,45E-04
2	5,2	475	120	9,80E-04
3	5,2	460	120	9,49E-04
4	5,2	460	120	9,49E-04
MÉDIA				9,56E-04

## ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM CARGA CONSTANTE

AMOSTRA DE VALIDAÇÃO EM ESTADO DE COMPACTAÇÃO MAIS ELEVADO



Q - VOLUME DE ÁGUA MEDIDO NA PROVETA

L - ALTURA DO CORPO DE PROVA

A - ÁREA DO CORPO DE PROVA

H - CARGA HIDRÁULICA

M - MASSA SECA

$\rho$  - MASSA ESPECÍFICA SECA

$\delta$  - DENSIDADE REAL

e - ÍNDICE DE VAZIOS

T - TEMPERATURA DO ENSAIO

Fc - FATOR DE CORREÇÃO

	cm <sup>3</sup>
<b>5,00</b>	cm
<b>194,33</b>	cm <sup>2</sup>
<b>89,50</b>	cm
<b>1735,00</b>	g
<b>1,786</b>	g/cm <sup>3</sup>
<b>2,650</b>	
<b>0,484</b>	
<b>25</b>	°C
<b>0,828</b>	

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \quad (\text{cm/s})$$

LEITURA N°	ALTURA L (cm)	Q (cm <sup>3</sup> )	t (s)	K (cm/s)
1	5,0	191	120	3,79E-04
2	5,0	187	120	3,71E-04
3	5,0	186	120	3,69E-04
4	5,0	182	120	3,61E-04
MÉDIA				3,70E-04