

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO ENGENHARIA CIVIL

Natália Ziesmann

**CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DE PARÂMETROS DE  
COMPRESSIBILIDADE DE SOLOS ARGILOSOS**

Florianópolis

2019

Natália Ziesmann

CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DA VARIABILIDADE DE PARÂMETROS DE  
COMPRESSIBILIDADE DE SOLOS ARGILOSOS

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia Civil do Centro Tecnológico da  
Universidade Federal de Santa Catarina como  
requisito para a obtenção do Título de Engenheira  
Civil

Orientador: Prof. Dr<sup>a</sup>. Gracieli Dienstmann

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ziesmann, Natália

Caracterização da variabilidade de parâmetros de compressibilidade de solos argilosos / Natália Ziesmann ; orientadora, Gracieli Dienstmann, 2019.

70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Compressibilidade. 3. Variabilidade. 4. Método Monte Carlo. 5. Elementos Finitos. I. Dienstmann, Gracieli. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Natália Ziesmann

**CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DA VARIABILIDADE DE PARÂMETROS DE  
COMPRESSIBILIDADE DE SOLOS MOLES**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Civil” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil.

Florianópolis, 29 de Novembro de 2019.

---

Prof. Luciana Rohde, Dra.  
Coordenadora do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof.<sup>a</sup> Gracieli Dienstmann, Dra.  
Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Rafael A. R. Higashi, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Ângela Grando, Dra.  
Pesquisadora de projetos na UFSC 2019/2

---

Eng.<sup>a</sup> Letícia Perini  
Tractebel Engineering

Este trabalho é dedicado à minha querida família.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer à minha família, minha mãe Anne, meu pai Wolf e minha imã Nicole. Me proporcionaram todas as condições para que tivesse uma excelente educação todos esses anos.

À minha orientadora Gracieli Dienstmann por me guiar ao longo do trabalho, por me motivar e me ouvir. Agradeço também por todo o conhecimento compartilhado.

À banca professor Rafael Higashi, Ângela Grando e Leticia Perini por doarem uma parte de seu tempo para lerem meu trabalho e ouvirem sobre ele.

Aos professores Fernando Schnaid e Edgar Odebrecht que forneceram os dados para que esse trabalho pudesse ser realizado.

À amiga Ângela pelos dados fornecidos, pelo incentivo aos estudos e pela generosidade com o mundo.

Aos meus colegas de CALEC, SAEC, Work Week, EREEC-Sul, Betonada, sem vocês eu não seria a pessoa que sou hoje. Muitos aprendizados adquiridos ao longo desses cinco anos e meio de faculdade.

Ao meu namorado Anderson pelo companheirismo, pelas noites de estudo e pela paciência.

Às grossinhas.

“Não é incrível tudo o que pode caber dentro de um lápis?” (Mafalda)

## RESUMO

Com a expansão geográfica das cidades, há uma crescente ocupação de regiões de solos moles até o momento evitadas. Dentro desse contexto, no caso de obras de engenharia, é preciso conhecer os parâmetros de compressibilidade para permitir a elaboração de melhores soluções técnicas e ter maior controle sobre a deformação do solo. Além disso, há uma necessidade complementar crescente de análises estatísticas dos parâmetros do solo. Nesse contexto, essa pesquisa analisa estatisticamente parâmetros do ensaios de adensamento realizados em municípios de Santa Catarina e Porto Alegre (RS). Os resultados obtidos nessa etapa são usados como dados de entrada para o Método Monte Carlo. Por meio dele, foi simulado um conjunto de valores gerados aleatoriamente, que mantém as características dos dados originais. Posteriormente, são aplicados em um modelo de ensaio de adensamento em um *software* de elementos finitos. Dessa forma, são obtidos deslocamentos para cada alteração dos parâmetros, que são analisados estatisticamente para obtenção de probabilidades de ocorrência de deslocamentos verticais.

**Palavras-chave:** Compressibilidade. Variabilidade. Solos Moles. Método Monte Carlo. Elementos Finitos.



## ABSTRACT

The increasing urban sprawl is encroaching into soft soil regions. In order to further this geographical expansion it is imperative to know compressibility parameters to have control over soil vertical deformation and to allow for better project solutions. Furthermore, there is a tendency to analyse the parameters statistically besides the usual analysis for this deformation. In this context, this research contains initially a statistical analysis of consolidation test parameters found in Southern part of Brasil. These results are input as data in the Monte Carlo Method. Through this method, soil parameters values are randomly generated maintaining the original features. Subsequently these values are applied in a consolidation test model in a finite element software. Therefore, for each change in the parameters, displacements were obtained and then statistically analysed. Finally, the probabilities of vertical displacement are achieved.

**Keywords:** Compressibility. Variability. Soft soil. Monte Carlo Method. Finite Elements.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organograma de classificação das incertezas na geotecnia. ....	17
Figura 2 – Formato típico da curva de distribuição normal. ....	20
Figura 3 – Possível formato da curva de distribuição log-normal. ....	21
Figura 4 – Corte de um perfil de solo. ....	26
Figura 5 – Esquema do ensaio de adensamento. ....	27
Figura 6 – Exemplo de curva de compressibilidade. ....	28
Figura 7 – Comportamento do material. ....	31
Figura 8 – Plano de compressão e índices de compressão e recompressão. ....	32
Figura 9 – Curva de compressibilidade com indicação dos coeficientes. ....	32
Figura 10 – Metodologia da presente pesquisa. ....	35
Figura 11 – Municípios onde foram realizados ensaios. ....	37
Figura 12 – Localização dos 22 pontos de investigação do depósito 4. ....	38
Figura 13 – Corpo de prova de ensaio de adensamento (medidas em metros). ....	40
Figura 14 – Malha utilizada no modelo de elementos finitos. ....	41
Figura 15 – Detalhe para os elementos e nós da malha. ....	41
Figura 16 – Condições de contorno do corpo de prova. ....	42
Figura 17 – Distribuição normal para índice de vazios inicial. ....	45
Figura 18 – Distribuição normal para o índice de vazios inicial normalizado. ....	45
Figura 19 – Distribuição log-normal da razão de pré-adensamento. ....	46
Figura 20 – Distribuição log-normal do índice de compressão. ....	46
Figura 21 – Distribuição normal para índice de vazios inicial. ....	49
Figura 22 – Distribuição log-normal para índice de vazios inicial normalizado. ....	50
Figura 23 – Distribuição log-normal para razão de pré-adensamento. ....	50
Figura 24 – Distribuição normal para índice de compressão. ....	51
Figura 25 – Distribuição log-normal do índice de recompressão. ....	51
Figura 26 – Distribuição normal do índice de vazios inicial. ....	55
Figura 27 – Distribuição normal do índice de compressão. ....	56
Figura 28 – Resultado de deformação do modelo em elementos finitos. ....	56
Figura 29 – Convergência do deslocamento para variação do índice de vazios. ....	57
Figura 30 – Distribuição log-normal dos deslocamentos (variação índice de vazios). .....	58

Figura 31 – Convergência do deslocamento para a variação do índice de compressão.  
..... 59

Figura 32 – Distribuição normal dos deslocamentos para a variação do índice de  
compressão. .... 59

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos valores obtidos para a análise estatística da área de estudo 1. .....	47
Quadro 2 – Resumo dos testes obtidos para a área de estudo 2. ....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de tentativas para atingir a convergência. ....	25
Tabela 2 – Dados de entrada para o trecho elástico. ....	43
Tabela 3 – Dados de entrada para o trecho plástico. ....	43
Tabela 4 – Dados de entrada da permeabilidade. ....	43
Tabela 5 – Probabilidade de ocorrência de deslocamentos. ....	58
Tabela 6 – Probabilidade de ocorrência de deslocamentos. ....	60
Tabela 7 – Tentativa de distribuições dos parâmetros da BR-470. ....	65

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A^2$	Estatística de Anderson-Darling
$a_v$	Coefficiente de compressibilidade
$c$	Quantidade de colunas no histograma
$C_c$	Coefficiente de compressão
$Cov$	Coefficiente de variação
$Cr$	Coefficiente de recompressão
$CR$	Razão de compressibilidade
$C_s$	Coefficiente de expansão
$c_v$	Coefficiente de adensamento vertical
$D$	Estatística de Kolmogorov-Smirnov
$E$	Frequência esperada
$e$	Índice de vazios
$G'$	Módulo de deformação cisalhante
$H$	Altura
$H_d$	Distância de drenagem
$H_s$	Altura ocupada por partículas sólidas
$M$	Inclinação da projeção da linha do estado crítico
$n$	Número de amostras
$\eta$	Inclinação da linha do estado crítico
$O$	Frequência observada
$OCR$	Razão de pré-adensamento
$p'(t)$	Pressão efetiva dependente do tempo
$p'$	Tensão octaédrica

$q$	Tensão desviatória
$s$	Desvio padrão
$s^2$	Variância
$T_v$	Drenagem na direção vertical
$u$	Pressão neutra
$v$	Volume específico
$W$	Estatística de Shapiro-Wilk
$\delta$	Confiança
$\delta\varepsilon$	Incremento de deformação
$\kappa$	Índice de recompressão
$\lambda$	Índice de compressão
$\mu$	Média
$\xi$	Erro
$\sigma'_{pa}$	Tensão de pré-adensamento
$\sigma'_v$	Tensão vertical efetiva
$\sigma'_{vm} = \sigma'_{pa}$	Tensão de sobreadensamento
$\varphi$	Expressão inversa da função distribuição acumulada
$\chi^2$	Estatística de Qui-Quadrado
$n_C$	Tamanho da amostra
$n_N$	Tamanho da amostra

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	INCERTEZAS NA GEOTECNIA .....	17
2.2	ESTATÍSTICA BÁSICA – DISTRIBUIÇÃO NORMAL E LOG-NORMAL ....	18
<b>2.2.1</b>	<b>Método Monte Carlo .....</b>	<b>23</b>
2.3	TEORIA DO ADENSAMENTO .....	25
<b>2.3.1</b>	<b>Ensaio de adensamento .....</b>	<b>26</b>
2.4	MODELO ELASTOPLÁSTICO DE CAM-CLAY .....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>35</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO 1 .....	36
3.2	ÁREA DE ESTUDO 2 .....	36
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	38
<b>3.3.1</b>	<b>MODELO EM ELEMENTOS FINITOS.....</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
4.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA – ÁREA DE ESTUDO 1 .....	44
4.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA – ÁREA DE ESTUDO 2.....	49
4.3	MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS .....	54
<b>4.3.1</b>	<b>Análise da variação do índice de vazios inicial .....</b>	<b>54</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Análise da variação do índice de compressão .....</b>	<b>55</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Apresentação dos resultados.....</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>61</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	61
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>







## 1 INTRODUÇÃO

A ocupação do território brasileiro se iniciou pelo litoral. Isso pode ser percebido pela quantidade de municípios situada nessa região do país. Durante muitos anos, construções sobre solos moles foram evitadas, pois esse tipo de solo apresenta baixa resistência e alta compressibilidade o que causa recalques excessivos nas construções. No entanto, atualmente, devido à expansão das cidades, esses terrenos estão sendo ocupados. Para isso, estudos devem ser realizados para melhor compreensão do comportamento do solo (OLIVEIRA 2006).

Uma etapa fundamental para caracterização do comportamento geomecânico dos solos é a realização de investigações geotécnicas, que avaliam parâmetros do solo que afetam a segurança, modelo e execução de um projeto de engenharia. Investigações insuficientes e interpretações errôneas de resultados contribuem para projetos inadequados, o que causa atrasos e por consequência, modificações dispendiosas na construção (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2001).

Outro aspecto a ser levado em consideração relativo à esta pesquisa é o estudo da variabilidade em solos. Atualmente, mesmo com muitas referências que estudam as incertezas dos problemas, Christian (2004) aponta que muitos engenheiros geotécnicos, como engenheiros de outras especialidades, desenvolveram estratégias para lidar com essas incertezas.

Uma das posturas frequentemente adotadas neste cenário pelo engenheiro é ser conservador. Muitas vezes o profissional faz a estrutura ou o sistema robusto que resiste às mudanças de comportamento não previstas. Em muitos casos essa postura resolve o problema técnico, porém normalmente a solução tem custo elevado. O autor chega a ser rigoroso quando escreve que uma das estratégias de se lidar com a incerteza é ignorá-la. Por fim, Christian (2004) aponta que a melhor postura de projeto é quantificar as incertezas, sendo que esse é o propósito da abordagem do trabalho do autor. O presente trabalho é inspirado nesta abordagem, pois objetiva identificar a variabilidade estatística de parâmetros de compressibilidade do solo, e utilizar esta abordagem na quantificação da incerteza relativa a previsão de deslocamentos no solo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Caracterizar a variabilidade de solos argilosos da região litorânea de Santa Catarina para aplicação em um modelo em elementos finitos do ensaio de adensamento e análise probabilística de deslocamentos verticais.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- (i) obter a função densidade de probabilidade e parâmetros estatísticos médios para cada um dos parâmetros do solo;
- (ii) obter um modelo de deformações do ensaio de adensamento;
- (iii) obter a probabilidade de ocorrência de deslocamentos verticais.

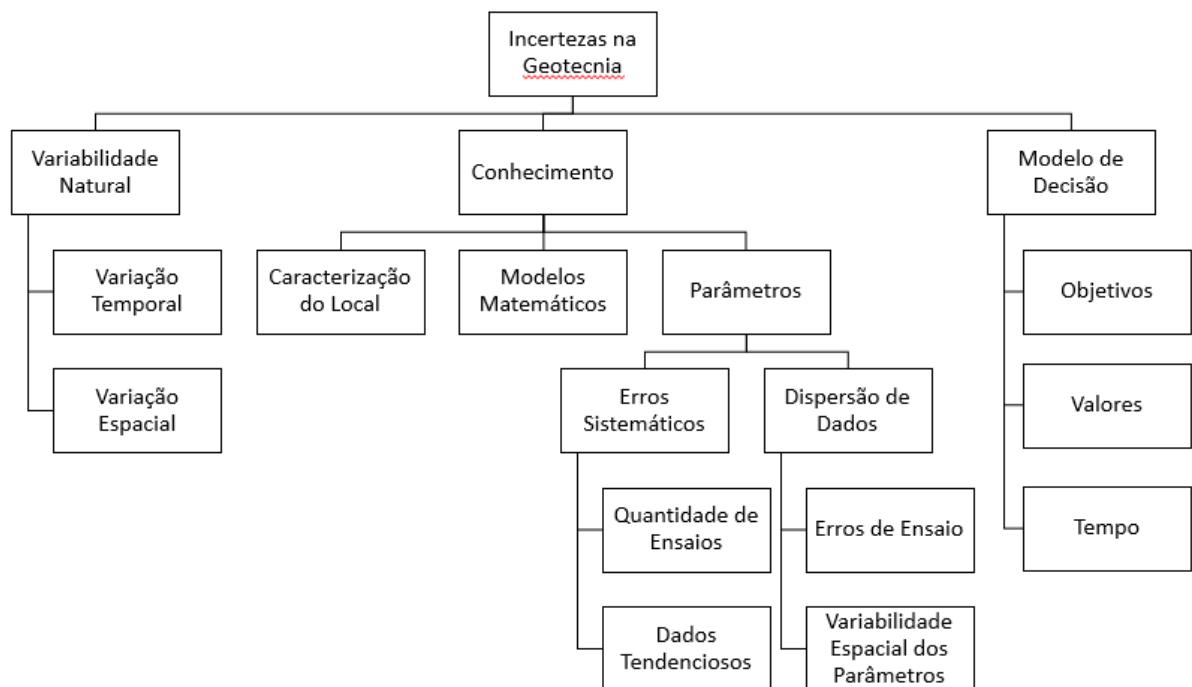
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta informações sobre as fontes de incerteza presentes na geotecnia, a variabilidade de parâmetros de adensamento, a teoria de adensamento, o modelo elasto-plástico de Cam Clay e o método de probabilidade (Método Monte Carlo).

### 2.1 INCERTEZAS NA GEOTECNIA

Conforme Baecher e Christian (2003) e Christian (2004), as incertezas na geotecnia podem ser divididas em três classificações: devido à sua variabilidade natural, devido ao modelo de decisão e por fim, a incerteza do conhecimento. A Figura 1 ilustra a classificação com maiores detalhes.

Figura 1 – Organograma de classificação das incertezas na geotecnia.



Fonte: Adaptada de Baecher e Christian (2003) e Christian (2004)

De acordo com os autores citados, a variabilidade natural refere-se à aleatoriedade inerente dos fenômenos naturais e pode ser subdividida ainda em variação temporal, que acontece em um único lugar e a variação espacial, que acontece em diferentes locais em um único tempo.

As incertezas do conhecimento são também chamadas de incertezas subjetivas ou incertezas internas. Elas são associadas ao modelo matemático escolhido para a adequada representação da realidade e a caracterização do local. Ambas situações tem relação com as interpretações geológicas. A incerteza dos parâmetros refere-se, portanto, à precisão que o parâmetro pode ser estimado pelo modelo (BAECHER E CHRISTIAN, 2003).

Com relação às propriedades dos parâmetros, estão inclusas incertezas resultantes de erros de ensaios (imprecisão da calibração e das medições) e da variabilidade intrínseca do solo como material. Esses dois pontos interferem posteriormente na dispersão dos dados estatísticos. Outros dois subitens das incertezas dos parâmetros são a quantidade de ensaios necessários e a percepção de dados tendenciosos obtidos de persistentes erros de ensaios ou instrumentação. Essas duas fontes de incerteza agrupadas fazem parte do que se chama de erro sistemático e que afeta diretamente a média do parâmetro em uma análise estatística (BAECHER E CHRISTIAN, 2003).

## 2.2 ESTATÍSTICA BÁSICA – DISTRIBUIÇÃO NORMAL E LOG-NORMAL

Os conceitos estatísticos dessa subseção servem como referência para a compreensão dos diferentes tipos de distribuição, com ênfase na normal e na log-normal, mais frequentemente utilizadas na prática geotécnica, segundo Lacasse e Nadim (1998). Também é apresentado um quadro geral de distribuições possíveis na literatura e disponíveis em softwares estatísticos a serem utilizados na presente pesquisa. A interpretação da presente etapa é baseada em Devore (2006).

Os parâmetros estatísticos referem-se à distribuição normal:

- Média amostral da variável X é dada pela Equação (1):

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1)$$

- Mediana é o valor do meio quando a variável X tem seus valores ordenados do menor para o maior, mesmo no caso de haver valores repetidos. Quando o número total de valores é par, para obter a mediana, é feita uma média com os dois valores centrais da lista ordenada da distribuição.

- Variância amostral é uma medida de dispersão de uma amostra que pode ser obtida pela Equação (2):

$$s^2 = \frac{\sum (X - \mu)^2}{n-1} \quad (2)$$

- O desvio padrão é uma outra medida de dispersão obtida pela Equação (3):

$$s = \sqrt{s^2} \quad (3)$$

- Segundo Phoon e Ching (2014), o grau de dispersão de uma variável é mais facilmente percebida quando expressa pelo coeficiente de variação (Cov), que é a taxa em que o desvio padrão varia com a média. Usualmente é representado como uma porcentagem e obtido com a Equação (4):

$$Cov = \frac{s}{\mu} \quad (4)$$

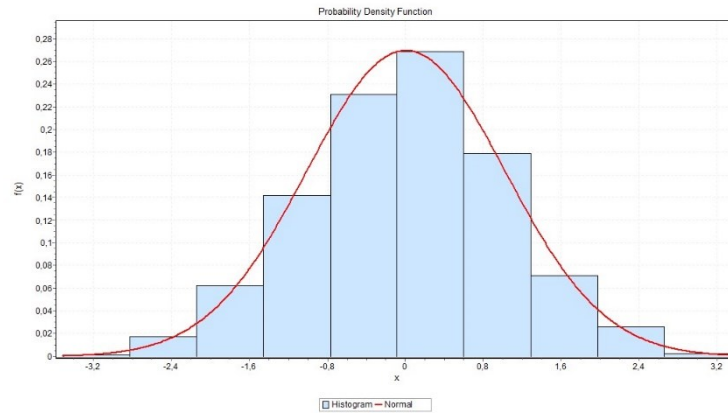
Conforme Devore (2006), a distribuição normal é a mais importante da estatística, uma vez que a maioria dos dados podem ser ajustados nessa distribuição mesmo eles apresentarem-se na forma discretizada há grande probabilidade de uma curva normal apresentar uma boa aproximação da distribuição.

A função densidade de probabilidade de uma distribuição normal obedece à Equação 5. Além disso, a média varia entre  $-\infty < \mu < +\infty$ .

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} e^{-\left(\frac{(X-\mu)^2}{2s^2}\right)}, -\infty < X < +\infty \quad (5)$$

A curva resultante dessa função é amplamente conhecida por possuir formato de sino, como pode ser observado na Figura 2. O centro do sino é tanto a média como a mediana da distribuição, é simétrico e possui amplitude de aproximadamente 6 desvios-padrão. As barras verticais da Figura 2 representam o histograma dos dados, ou seja a frequência com que cada valor de determinado parâmetro aparece.

Figura 2 – Formato típico da curva de distribuição normal.



Fonte: Autora.

A probabilidade da distribuição normal costuma ser resolvida pela curva normal-padrão. Para isso, foram tabulados valores de  $Z$  (variável aleatória normal padrão) para a média de seus valores igual a 0 e o desvio padrão igual a 1. A partir dessa tabela é possível encontrar a probabilidade de um evento em função de  $Z$ , com o auxílio da Equação (6):

$$Z = \frac{X - \mu}{s} \quad (6)$$

Para a distribuição log-normal, os parâmetros utilizados são os mesmos: média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $s$ ). No entanto, nesse caso esses são a média e desvio padrão de logaritmo natural de  $X$  e não da variável. Essa variável necessariamente é não negativa, pois é preciso realizar a operação  $\ln(X)$ . Diz-se que se  $X$  possui uma distribuição log-normal, sabe-se que  $\ln(X)$  possui uma distribuição normal. Uma é o contrário da outra. Por definição, tem-se a função da Equação (7):

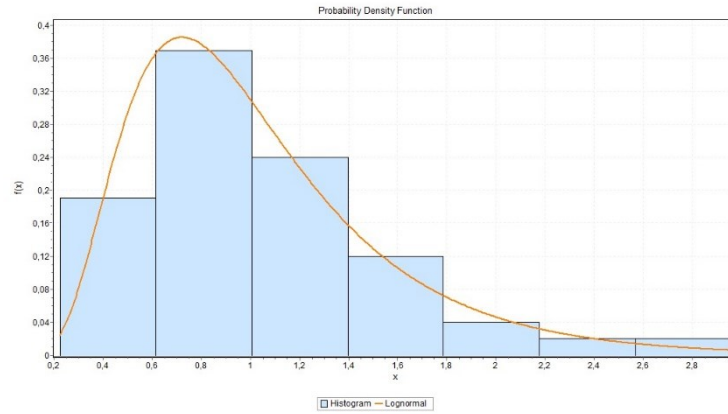
$$f(X; \mu, s) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi s X}} e^{-\frac{[\ln(X) - \mu]^2}{2s^2}}, & X \geq 0 \\ 0, & X = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Um exemplo de curva de distribuição log-normal é apresentado na Figura 3. As curvas podem apresentar aspectos variados, por isso não há uma curva com formato típico, no entanto algumas características podem ser citadas. A média nem sempre assume o valor da mediana, a



curva possui uma assimetria à esquerda e o máximo valor da ordenada do gráfico apresenta a moda, que é a variável que se repete com maior frequência.

Figura 3 – Possível formato da curva de distribuição log-normal.



Fonte: Autora.

Além da verificação visual das curvas, ainda é possível encontrar na bibliografia testes de aderência para verificar se a distribuição teórica se ajusta aos dados reais (amostra). Mohd Razali e Bee Wha (2011) compararam o resultado de quatro testes de normalidade: Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors e Anderson-Darling. Desses, o teste que melhor apresentou resultados foi o Shapiro-Wilk, em segundo lugar o teste Anderson-Darling e, por último, Kolmogorov-Smirnov.

Bielefeldt et al. (2012) compararam a aplicabilidade de oito testes: Qui-quadrado, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, Shapiro-Wilk, Shapiro-Francia, Cramer-von Mises, Anderson-Darling e Jarque-Bera. Além da comparação dos testes para distribuição normal, ainda compararam os resultados para diversas amostragens. Como conclusão observaram que os melhores testes são os de Shapiro, no entanto Anderson-Darling apresentou resultados próximos destes. É perceptível que para amostras acima de 30 e próximas a 50 o acerto dos testes possa atingir mais de 60%. Mohd Razali e Bee Wha (2011) também concluem que para amostragens com tamanho acima de 30 os resultados são mais satisfatórios.

Assim, Shapiro e Wilk (1965) definiram a probabilidade com base na Equação (8):

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i y_i\right)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

Onde:

$y_i$  é a ordem estatística,  $\bar{y}$  é a média dos valores da amostra e  $a_i$  é obtida com a Equação (9) e auxílio da Equação (10):

$$a_i = (a_1, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{\sqrt{(m^T V^{-1} V^{-1} m)}} \quad (9)$$

$$m = (m_1, \dots, m_n)^T \quad (10)$$

Onde:

$m$  são os valores esperados da ordem normal padrão da distribuição normal e  $V$  é a matriz de covariância.

O valor de  $W$  varia entre 0 e 1. Valores menores significam a rejeição da hipótese inicial de que a distribuição dos valores aleatórios se enquadraria na distribuição normal. Valores mais próximos de 1 indicam que a hipótese inicial não poderia ser descartada.

O teste Anderson-Darling definido por D'Agostino e Stephens (1986) determina a estatística do teste como indica a Equação (11).

$$A^2 = -n + \sum_{i=1}^n \frac{2i-1}{n} [\ln(F(Y_i)) + \ln((1-F(Y_{n+1-i})))] \quad (11)$$

Onde:

$n$  é o tamanho da amostra

$F(Y)$  é a função testada.

Valores de  $A$  mais próximos de 0 indicam uma melhor adequação da distribuição submetida ao teste.

O teste de Kolmogorov-Smirnov possui a estatística da Equação (12).

$$D = \max \left( F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right) \quad (12)$$

Onde:

$F(x)$  é a função da distribuição submetida ao teste.

Valores de D mais próximos de 0 indicam uma melhor adequação da distribuição testada.

Para o teste de Qui-Quadrado, a Equação (13) indica sua estatística.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (13)$$

Onde:

O é a frequência observada.

E é a frequência esperada.

Valores de  $\chi^2$  mais próximos de 0 indicam uma melhor adequação da distribuição submetida ao teste.

D'Agostino e Stephens (1986) também consideram que os últimos dois testes (Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado) não são adequados para avaliar a normalidade. Dessa forma, para esse tipo de distribuição são indicados os testes que melhor a avaliam, Shapiro-Wilk e o Anderson-Darling.

Além da estatística de cada teste, ainda pode-se calcular o valor-P. Segundo Devore (2006), o valor P é o nível de significância observado. O pesquisador adotaria o menor nível de significância para o qual a hipótese inicial seria rejeitada para um determinado teste de conjunto de dados. Resumidamente, caso o valor P seja menor ou igual ao nível de significância adotado, a hipótese inicial é rejeitada. Caso o valor P seja maior, a hipótese não seria rejeitada. Assim, quanto menor o valor P, mais contraditórios os dados da hipótese inicial. Normalmente, o nível de significância adotado é de 0,1; 0,05 e 0,01.

### 2.2.1 Método Monte Carlo

Segundo Hammersley e Handscomb (1964) o primeiro uso do Método Monte Carlo para uma pesquisa foi no desenvolvimento da bomba atômica durante a Segunda Guerra Mundial. No entanto, ainda podem ser encontrados indícios de seu uso na segunda metade do século XIX.

O Método de Monte Carlo é um método numérico que permite resolver problemas matemáticos mediante a simulação de variáveis aleatórias. Os problemas resolvidos por Monte

Carlo são de dois tipos: probabilístico e determinístico. No caso dos problemas probabilísticos, a proposta é observar os números aleatórios que são escolhidos de forma que eles simulam diretamente os processos aleatórios do problema original. Assim infere-se a solução desejada do comportamento dos números aleatórios. No caso do problema ser determinístico, o método consiste em tratá-lo mediante uma analogia probabilística. Dessa forma, pode-se dizer que o método Monte Carlo é universal na solução de problemas matemáticos. Essa explicação foi resumida por Lazo (2009).

Inicialmente os dados são selecionados e analisados. A confiabilidade da análise é testada, caso os dados estejam convergindo, a simulação chega a um fim. Caso não estejam, o processo é repetido até que a convergência seja atingida.

Dessa forma, uma das preocupações do método é saber aproximadamente quantas iterações é preciso realizar para que seja atingida a convergência. As propostas de Fishman (1995) são apresentadas nas Equações (14) e (15), onde  $n_C$  e  $n_N$  fornecem os tamanhos de amostras necessárias para as simulações.

$$n_C(\xi, \delta) = \frac{1}{4 * \delta * \xi^2} \quad (14)$$

Onde:

$\delta$  é a confiança.

$\xi$  é o erro.

$$n_N(\xi, \delta) = \left[ \frac{\Phi^{-1}\left(1 - \frac{\delta}{2}\right)}{2 * \xi} \right]^2 \quad (15)$$

Onde:

$\Phi^{-1}(x)$  é a expressão inversa da função distribuição acumulada.

A Equação (14) costumeiramente resulta em amostras maiores do que normalmente necessárias, ainda segundo Fishman (1995). Isso motivou a pesquisa por formas alternativas para definição de amostras menores com mesmo erro e nível de confiança que a equação

anterior. Com relação à Equação (15), Fishman (1995) apontou que pesquisadores preferem adotar como tamanho de amostra, o dobro do que a equação sugere.

A partir dessas equações é preciso escolher um nível de confiança e um erro máximo desejado para se chegar a um tamanho aceitável de tentativas na simulação. Em Baecher e Christian (2003) pode ser encontrada a Tabela 1 com a comparação do tamanho das amostras dependendo da equação escolhida para um mesmo nível de confiança e erro admitidos. Dessa forma, para um erro admitido de 0,1 e nível de confiança de 90%, o número de tentativas adequado pode ser de 250 ou 68 dependendo da metodologia adotada.

Tabela 1 – Número de tentativas para atingir a convergência.

$\xi$	90% de confiança		95% de confiança	
	$n_C$	$n_N$	$n_C$	$n_N$
0,005	100.000	27.056	200.000	38.415
0,01	25.000	6.764	50.000	9.604
0,02	6.250	1.691	12.500	2.401
0,03	2.778	752	5.556	1.068
0,04	1.563	423	3.125	600
0,05	1.000	271	2.000	385
0,1	250	68	500	97
0,2	63	17	125	25
0,3	28	8	56	11
0,4	16	5	32	4
0,5	10	3	20	4

Fonte: Baecher e Christian (2003).

### 2.3 TEORIA DO ADENSAMENTO

Segundo Caputo (2008), o principal fator de recalque no solo é a compressibilidade, a qual indica a diminuição do seu volume a depender da carga aplicada. Com o propósito de explicar sucintamente o mecanismo do adensamento a Figura 4 servirá como exemplo. Na imagem está esquematizado um corte de um terreno que contém uma camada de areia com o nível de lençol freático que passa por essa faixa, uma camada de argila saturada e por fim, a rocha. Ainda na Figura 4 está representada uma sapata apoiada na camada de areia para representar o carregamento.

Em um ponto qualquer na camada de argila saturada, considera-se que  $p_0$  seja a pressão nesse ponto transmitida apenas pela fundação. Parte da pressão recebida é transmitida para partículas sólidas da camada argilosa  $p'$  e parte, para a água contida entre essas partículas

$u$ . Com o passar do tempo, a água flui até a camada drenante de areia e as partículas sólidas passam assim a suportar mais carga originada da sapata. Assim, formulou a Equação (16).

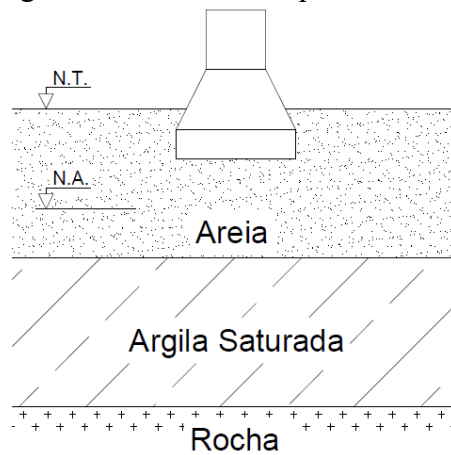
$$p_0 = p'(t) + u(t) \quad (16)$$

Onde:

$p'$  é a pressão efetiva variando com relação ao tempo.

$u$  é a pressão neutra variando com relação ao tempo.

Figura 4 – Corte de um perfil de solo.



Fonte: Adaptada de Caputo (2008).

A formulação teórica que descreve o processo de consolidação (transmissão das tensões atuantes na água para as partículas sólidas) foi proposta por Terzaghi admitindo algumas hipóteses simplificadoras: a camada de argila tem dimensão constante, é lateralmente confinada e o solo é homogêneo. Todos os vazios do solo contém água, que é incompressível assim como as partículas sólidas. A água escoar apenas verticalmente e obedece à lei de Darcy. Em laboratório o processo de consolidação é estudado pelo ensaio de adensamento que será brevemente descrito na próxima seção.

### 2.3.1 Ensaio de adensamento

O objetivo do ensaio de adensamento unidimensional é determinar propriedades de adensamento do solo quando lateralmente confinado e axialmente carregado e drenado. O carregamento aplicado em intervalos pré-definidos em um período que garanta que toda a

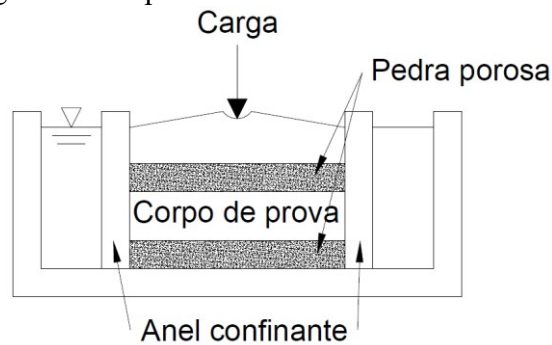
poropressão gerada por este incremento de carga tenha sido dissipada. Segundo Caputo (2008) a maioria dos oedômetros (aparelho com o qual é realizado o ensaio) aplicam o princípio introduzido por Terzaghi, da compressão de uma amostra de altura pequena em relação ao diâmetro.

Atualmente a norma NBR 12.007 – Ensaio de adensamento unidimensional se encontra cancelada e no entanto, ainda é referência para o ensaio e foi o fundamento dessa revisão bibliográfica.

Um dos componentes principais de um ensaio de adensamento é o anel de adensamento: um anel preferencialmente de aço inoxidável com dimensões definidas por norma, que não permita a deformação radial do corpo de prova. Há necessidade também de um par de pedras porosas, que possuem requisitos a serem seguidos, para que haja drenagem durante a aplicação de carga. E, naturalmente, necessita-se também de um prensa de adensamento para aplicação dos incrementos de carga.

A montagem da célula de adensamento obedece à seguinte sequência: base rígida, pedra porosa inferior, papel-filtro, corpo-de-prova contido no anel metálico, papel-filtro e pedra porosa superior. Um esquema representativo consta na Figura 5.

Figura 5 – Esquema do ensaio de adensamento.



Fonte: Autora.

Antes da execução do ensaio é preciso obter a umidade e massa específica aparente iniciais da amostra de solo. Os procedimentos do ensaio: aplicar tensão de assentamento de 2,0kPa (solos moles) por cinco minutos.

Para obtenção das pressões totais, é preciso aplicar tensões de aproximadamente 10kPa, 20kPa, 40kPa, 160kPa e assim por diante até a definição da região de compressão virgem. Para cada um dos estágios de pressão deve-se fazer leituras da variação da altura do corpo de prova, com precisão de 0,01mm logo antes do carregamento e nos seguintes intervalos

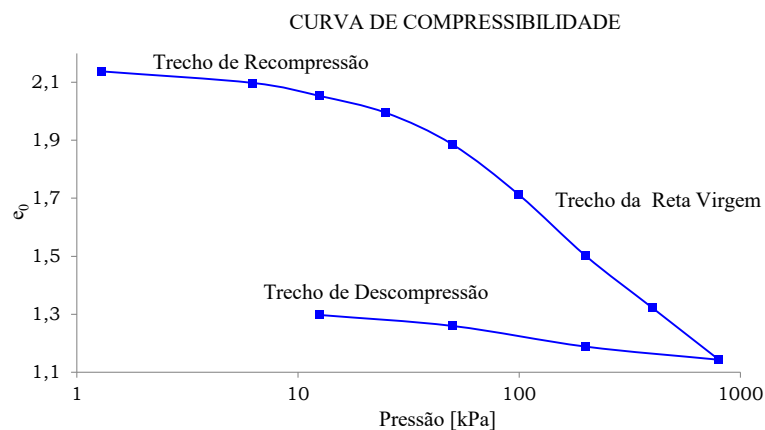
de tempo: 0,075 s, 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h. Esses tempos devem ser contados a partir do instante de aplicação do incremento de carga.

Cada intervalo de carga aplicada corresponde uma redução de altura da amostra, a qual se expressa segundo a variação do índice de vazios. O índice de vazios ao final de cada estágio de pressão é o mostrado na Equação (17) onde  $e$  é o índice de vazios,  $H$  é a altura do corpo de prova ao final do estágio e  $H_s$  é a altura ocupada pelas partículas sólidas.

$$e = \frac{H}{H_s} - 1 \quad (17)$$

Com os pares de valores de tensão e índice de vazios é possível plotá-los em um gráfico semilogarítmico e obter uma curva similar à obtida na Figura 6. No eixo da abscissas localizam-se o valor das pressões em escala logarítmica e no eixo das ordenadas são representados os índices de vazios.

Figura 6 – Exemplo de curva de compressibilidade.



Fonte: Adaptada de Grandó (2018).

Na curva é possível destacar três trechos distintos. O primeiro é o trecho de recompressão que é chamada assim devido ao fato de representar o ramo pré-adensado da amostra. A segunda parte é a chamada reta virgem e representa o comportamento do solo mediante a tensões novas, ainda não suportadas. A última parte é a curva de expansão da amostra, que demonstra o resultado do descarregamento do ensaio.

Um dado importante que pode ser retirado desse gráfico é a pressão de pré-adensamento ( $\sigma'_p$ ) ou de sobreadensamento ( $\sigma'_{vm}$ ). Essa pressão define a transição de



comportamento pré-adensado e normalmente adensado e pode ser determinada pelo Método de Casagrande ou Pacheco-Silva.

Outros parâmetros relevantes obtidos a partir do adensamento, como exposto em Holtz e Kovacs (1981), são:

- Coeficiente de compressibilidade ( $a_v$ ), que é um indicador da compressibilidade do solo. Representa a variação entre os índices de vazios ( $e$ ) e as tensões efetivas ( $\sigma'$ ) e, é obtido por meio da equação (18):

$$a_v = -\frac{de}{d\log\sigma'} \quad (18)$$

- Coeficiente de compressão ( $C_c$ ), de recompressão ( $C_r$ ) e de expansão ( $C_s$ ) = ( $C_r$ ), que representam a inclinação dos trechos da reta virgem e de recompressão e descompressão, respectivamente.
- Razão de compressibilidade, obtida com a equação (19) e auxílio da relação da equação (20):

$$CR = \frac{C_r}{C_c} \quad (19)$$

$$CR = \frac{C_c}{(1+e_0)} \quad (20)$$

- Razão de pré-adensamento (*OCR-Over-Consolidation Ratio*) ou de sobreadensamento, obtida por meio da relação entre  $\sigma'_p$  (tensão de pré-adensamento) e  $\sigma'_i$  (tensão efetiva inicial), descrita na equação (21);

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_i} \quad (21)$$

- Coeficiente de adensamento vertical ( $c_v$ ), obtido com a Equação (22), que é a relação entre a distância de drenagem ( $Hd$ ), e de um fator referente ao tempo ( $t$ ) para ocorrência da drenagem na direção vertical ( $Tv$ ):

$$cv = \frac{Tv \cdot Hd^2}{t} \quad (22)$$

- Índice de vazios inicial e final.

## 2.4 MODELO ELASTOPLÁSTICO DE CAM-CLAY

Neste subitem será brevemente descrito o modelo constitutivo de cam-clay (ROSCOE E BURLAND, 1968), um modelo elasto-plástico utilizado para representar o comportamento de geomateriais.

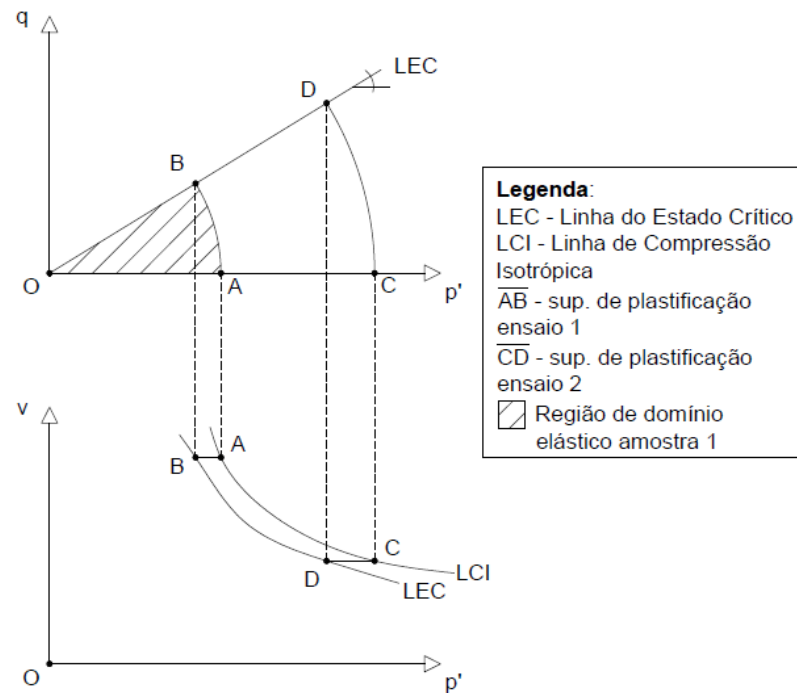
A discussão de tensão-deformação por conveniência, segundo Wood (1992), é sempre apresentada em um modelo descrito em termos de tensões de ensaios triaxiais  $p'$  (tensão octaédrica) e  $q$  (tensão desviatória) e suas respectivas deformações  $\varepsilon_{p'}$  e  $\varepsilon_q$ .

A Figura 7 mostra um conjunto de ensaios triaxiais consolidados isotropicamente e cisalhados não drenados (CIU). O modelo de cam-clay utiliza curvas básicas apresentadas para definição do comportamento. Observa-se que: para a amostra 1 que foi consolidada de  $\overline{OA}$  e posteriormente cisalhada de  $\overline{AB}$  existe uma região de comportamento elástico limitado pela região compreendida entre a trajetória de  $\overline{AB}$  e LEC (traçada a partir das tensões máximas desenvolvidos em cada ensaio).

Se uma segunda amostra for consolidada de  $\overline{OC}$  a região de domínio elástico expande-se e uma nova superfície de plastificação é determinada.

Os pontos das trajetórias quando levados ao espaço  $p'$ - $v$  caracterizam as linhas de compressão isotrópica e LEC.

Figura 7 – Comportamento do material.



Fonte: Adaptado de Budhu (2012).

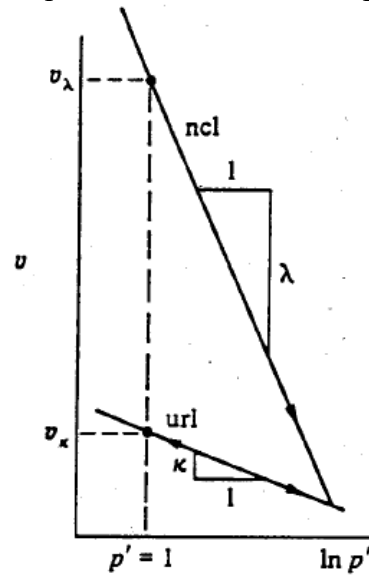
O comportamento elástico e o histórico de tensões a que é submetida uma amostra de solo ilustrados na Figura 7 ainda demonstram a irrecuperabilidade e a natureza plástica da mudança de volumes no solo em compressão normal.

Normalmente o gráfico do plano  $p' \times v$  possui a abcissa  $p'$  plotada em escala logarítmica natural. Ou seja, o eixo horizontal teria valores do logaritmo natural da tensão como pode ser observado na Figura 8. Assim é possível obter as relações apresentadas nas equações (23) e (24). Onde  $\lambda$  e  $\kappa$  são os índices de compressão e recompressão, respectivamente.  $v_\lambda$  e  $v_\kappa$  são os volumes específicos do solo para um valor  $p'$  unitário no sistema de medidas utilizado.

$$v = v_\lambda - \lambda \cdot \ln(p') \quad (23)$$

$$v = v_\kappa - \kappa \cdot \ln(p') \quad (24)$$

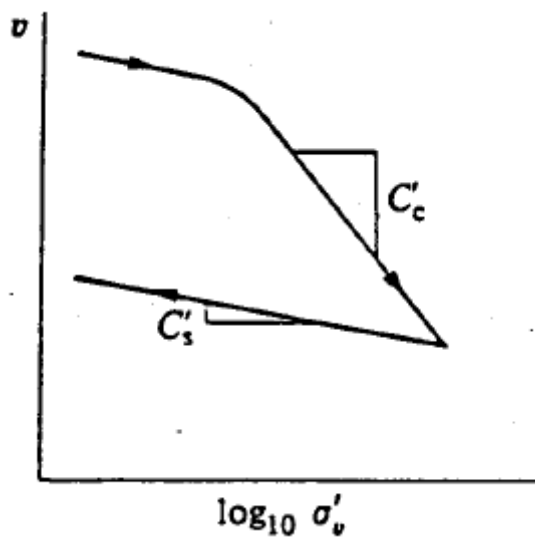
Figura 8 – Plano de compressão e índices de compressão e recompressão.



Fonte: Wood (1992).

Os resultados dos ensaios de adensamento são plotados em um gráfico semilogarítmico, como visto no subitem 2.3.1 Ensaio de adensamento. Na Figura 9 é possível observar esse gráfico com a indicação dos coeficientes de compressão e recompressão. A partir dele também é possível obter equações equivalentes às Equação (23) e Equação (24).

Figura 9 – Curva de compressibilidade com indicação dos coeficientes.



Fonte: Wood (1992).

A Equação (25) representa a fase de compressão e a equação (26) representa a fase de recompressão ou expansão. Os volumes onde interceptam com  $\sigma'_v=1$  são  $v_c$  e  $v_s$ .

$$v=v_c-C_c*\log_{10}(\sigma'_v) \quad (25)$$

$$v=v_s-C_s*\log_{10}(\sigma'_v) \quad (26)$$

A principal diferença entre as equações (23) e (24) para as equações (25) e (26) é que no primeiro conjunto a base é em logaritmo natural e no segundo, é logaritmo na base dez. É possível relacionar os coeficientes como indicam as equações (27) e (28).

$$C_c=\lambda*\ln 10 \quad (27)$$

$$C_s=\kappa*\ln 10 \quad (28)$$

Outro parâmetro importante do modelo é o  $M$ , que representa a inclinação da linha do estado crítico no espaço  $p'$ - $q$ . A reta caracteriza a condição de estado crítico do solo. Uma expressão para a obtenção da inclinação com base no ângulo de atrito, pode ser visualizada na Equação (29).

$$M=\frac{6*\text{sen}\phi_{\text{crít}}}{3-\text{sen}\phi_{\text{crít}}} \quad (29)$$

Onde:

$\phi_{\text{crít}}$  é o ângulo de atrito crítico.

Oliveira (2006) obteve um ângulo de atrito efetivo para as argilas de Pirajubaé, em Florianópolis, Santa Catarina igual a  $26^\circ$ , que será tomado como base para essa pesquisa.

Com base nos parâmetros descritos, as deformações elásticas e plásticas do modelo cam-clay são escritas respectivamente pela Equação (30) e pela Equação(31).

$$\begin{pmatrix} \delta\varepsilon_v^e \\ \delta\varepsilon_s^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\kappa}{vp'} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3G'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{pmatrix} \delta\varepsilon_v^e \\ \delta\varepsilon_s^e \end{pmatrix} = \frac{(\lambda - \kappa)}{vp'(M^2 + \eta^2)} \begin{pmatrix} (M^2 + \eta^2) & 2\eta \\ 2\eta & \frac{4\eta}{(M^2 + \eta^2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta p' \\ \delta q \end{pmatrix} \quad (31)$$

Onde:

$\eta$  é representada pela Equação (32).

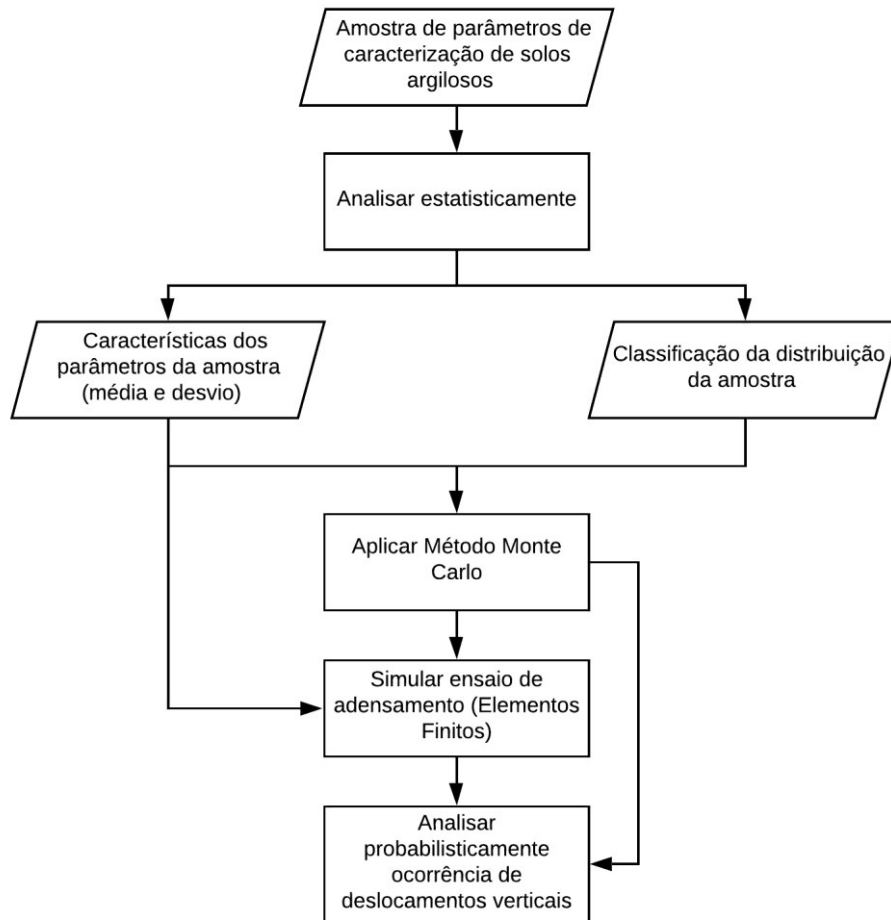
$$\eta = \frac{q}{p} \quad (33)$$

$G$  é o módulo de deformação cisalhante

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

Este capítulo contém o método utilizado na pesquisa. Suas etapas encontram-se na Figura 10.

Figura 10 – Metodologia da presente pesquisa.



Da Figura 11 pode ser inferido que a partir de uma amostra de parâmetros obtidas de Schnaid e Odebrecht (2012) e Grandó (2018) foi inicialmente realizada a análise estatística dos seguintes parâmetros: índice de vazios inicial, índice de compressão, índice de recompressão, razão de pré-adensamento.

Como resultados dessa etapa foram obtidas as funções densidade de probabilidade, média e desvio padrão para cada um desses parâmetros. Esses resultados foram utilizados para a aplicação posterior no Método Monte Carlo. Por meio dele, foi simulado um conjunto de valores gerados aleatoriamente, que mantém as características dos dados originais.

Os valores aleatórios foram utilizados em um conjunto de modelagens de ensaios de adensamento no *software* de elementos finitos Abaqus. Para o comportamento do solo foi utilizado o modelo elasto-plástico *clay-plasticity*.

Por fim, o Método Monte Carlo foi aplicado novamente para a análise probabilística da ocorrência de deslocamentos.

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO 1

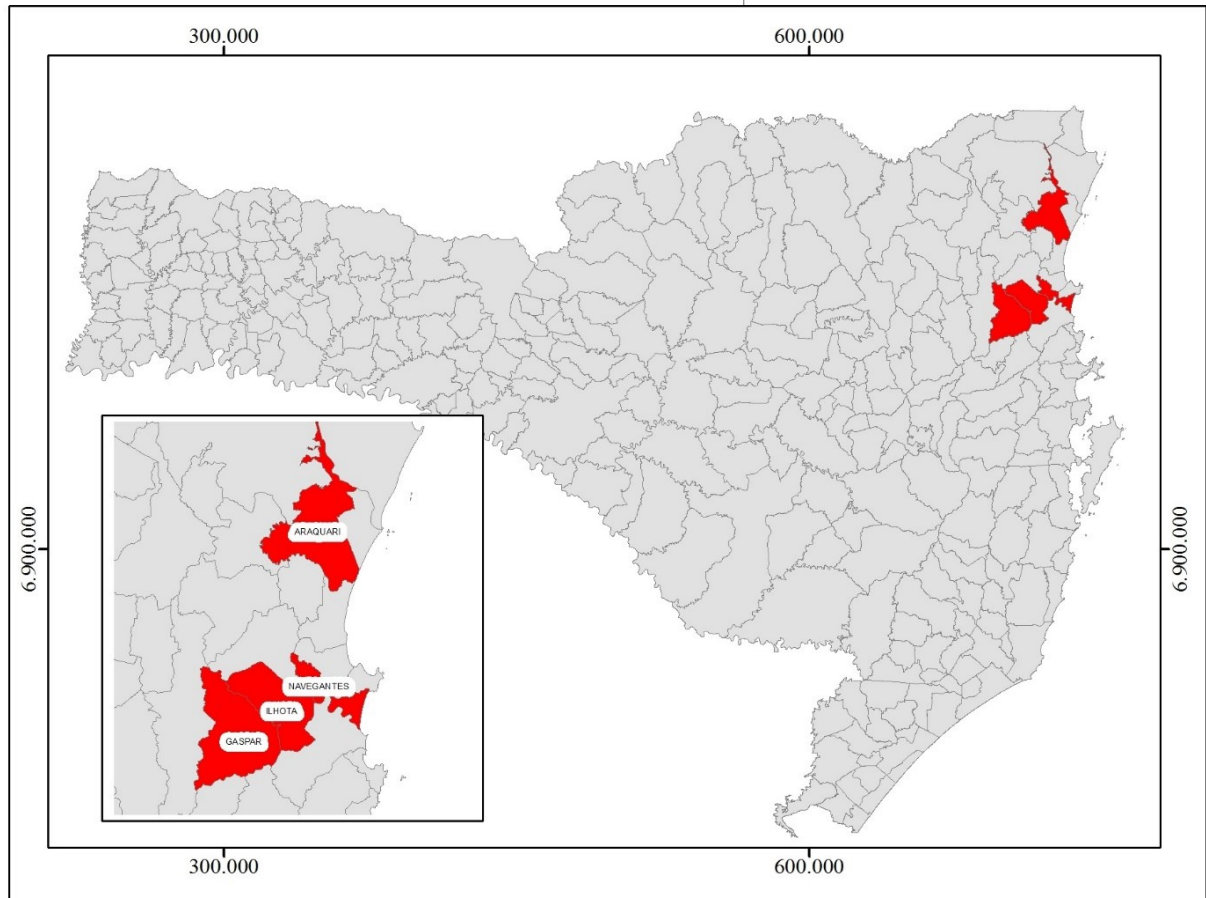
A área de estudo 1 compreendeu quatro municípios do litoral do estado de Santa Catarina: Gaspar, Ilhota, Navegantes e Araquari, além do município de Porto Alegre, capital do estado do Rio Grande do Sul. Os dados foram utilizados por Schnaid, Odebrecht (2012) e fornecidos pela empresa Geoforma Engenharia Ltda.

### 3.2 ÁREA DE ESTUDO 2

Os dados dos ensaios de laboratório utilizados são característicos da região norte do Estado de Santa Catarina e compreendem o depósito 4 das pesquisas de Grandó (2018). Os municípios que compõem a área de estudo são Gaspar, Ilhota, Navegantes e Araquari, conforme destacado na Figura 11. Nesses locais foram realizados 40 ensaios de adensamento em amostras que foram retiradas em distintas profundidades de um mesmo perfil vertical ou somente de uma profundidade de um perfil.



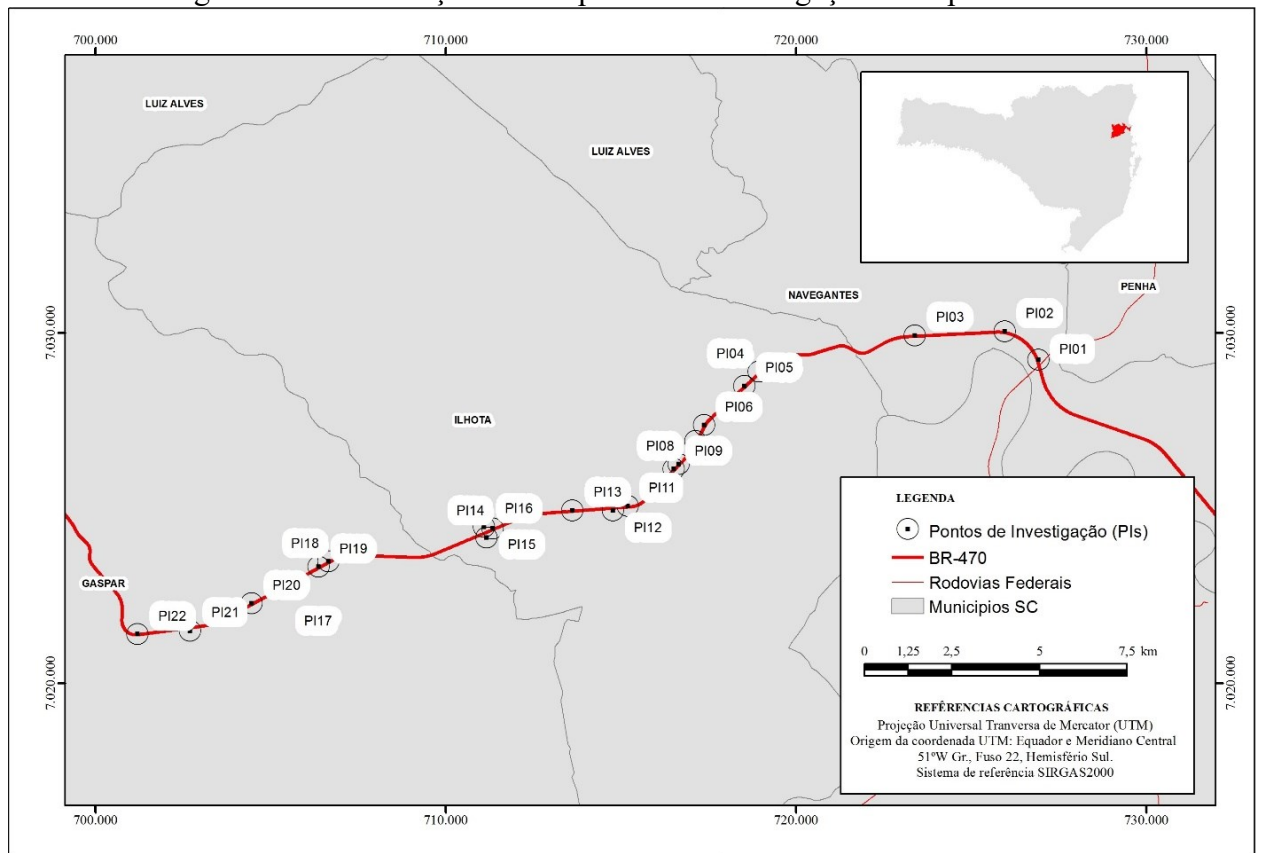
Figura 11 – Municípios onde foram realizados ensaios.



Fonte: Autora.

Um mapa mais detalhado da região de Navegantes, Ilhota e Gaspar, mais precisamente na extensão de um trecho da BR-470, o depósito 4, é ilustrado na Figura 12. Nela constam enumerados pontos de investigação de 1 a 22.

Figura 12 – Localização dos 22 pontos de investigação do depósito 4.



Fonte: Adaptada de Grando (2018).

Nos pontos de investigação da BR-470 haviam catorze amostras classificadas como turfa ou amolgado. Os parâmetros dessas amostras não foram levadas em consideração para a análise estatística. Isso teve como consequência a redução para vinte e seis o tamanho da amostra.

Ao final do trabalho consta no APÊNDICE A as distribuições de parâmetros do solo apenas com os dados de ensaios do trecho da BR-470 identificado anteriormente. Não foi possível utilizar os dados desse sítio apenas devido ao insuficiente tamanho da amostra.

### 3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a etapa inicial foram necessárias uma quantidade significativa de amostras de um mesmo parâmetro para que ele fosse analisado estatisticamente. Com essa amostra foi elaborado um histograma e a curva de função densidade de probabilidade a ser avaliada. A avaliação se deu por duas análises: visual e numérica.

Com relação à análise qualitativa (visual): comparou-se a curva com a tendência que o histograma apresentava. Na verificação de uma distribuição normal, a quantidade ótima de colunas do histograma é igual a  $c$ , que pode ser obtido pela Equação (34), onde  $i$  é o tamanho da amostra.

$$c=1+3,3*\log_{10}i \quad (34)$$

A segunda análise refere-se à realização de testes para avaliar a aderência dos dados reais a uma função de distribuição de probabilidade (FDP). Os testes utilizados foram Shapiro-Wilk, Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado.

Para o auxílio da análise numérica foi utilizado o *software* Easy Fit da empresa Mathwave. O conjunto de valores a serem verificados são inseridos no *software* e ele realizou testes para quarenta e nove distribuições de variáveis contínuas e oito distribuições de variáveis discretas. Além disso, ainda gerou os gráficos correspondentes para cada tipo de distribuição. Outro dado de saída do programa é uma lista decrescente das distribuições que melhor se enquadrara para os valores submetidos. Essa classificação usou como referência o teste de Anderson-Darling. Um ponto a ser destacado é o fato de que o *software* contém apenas os testes Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado.

Além do Easy Fit, foi utilizada a linguagem R para a verificação do teste Shapiro-Wilk e seu valor-P. Essa análise foi executada após a distribuição normal ter sido constatada no primeiro *software*. Segundo a literatura (LACASSE E NADIM, 1998) as distribuições mais utilizadas na geotecnia são a normal e log-normal. Para cada parâmetro foi escolhida a distribuição dentre essas que apresentava o melhor resultado no teste de Anderson-Darling. Além disso foram verificados o valor-P.

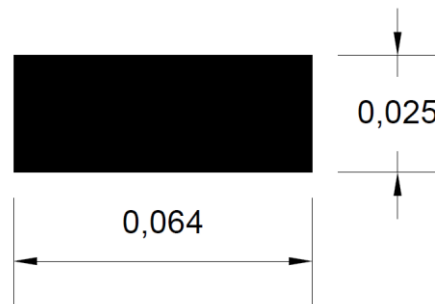
Definido o modelo distributivo que melhor representa os parâmetros do solo, foram determinados também os parâmetros estatísticos para cada parâmetro do adensamento. No caso das distribuições normal e log-normal, são utilizados a média e o desvio padrão.

Os dados da etapa estatística foram usados posteriormente em um modelo de elementos finitos do ensaio de adensamento.

### 3.3.1 MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

A modelagem do ensaio de adensamento foi realizada utilizando o *software* Abaqus em sua versão estudantil. A geometria do corpo de prova é bidimensional e está identificada na Figura 13, onde consta uma seção de comprimento de 0,064m e altura de 0,025m. Esses comprimentos foram retirados de Braja e Sobhan (2014).

Figura 13 – Corpo de prova de ensaio de adensamento (medidas em metros).



Fonte: Autora.

Utilizou-se uma malha quadrática com oito nós por elemento da malha. Com a limitação de 1000 nós da versão estudantil do programa foi possível chegar a 260 elementos planos e 853 nós, assim representado pelo código CPE8RP. Esse código indica a existência de um elemento com 8 nós de deslocamento com funções de interpolação bi-quadrática para deslocamento e bilinear para poropressão.

A Figura 14 ilustra a malha utilizada no modelo do ensaio de adensamento e a Figura 15 contém dois dos elementos superiores da malha. É possível observar que são o penúltimo e último elementos da malha. Cada um dos elementos possui oito nós. O elemento 260, por exemplo possui os nós: 269, 270, 296, 800, 850, 852 e 853.

Figura 14 – Malha utilizada no modelo de elementos finitos.

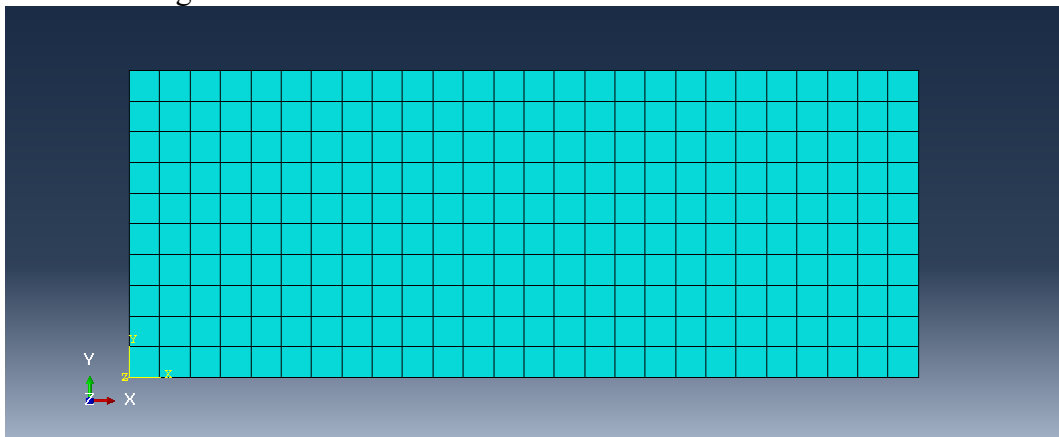
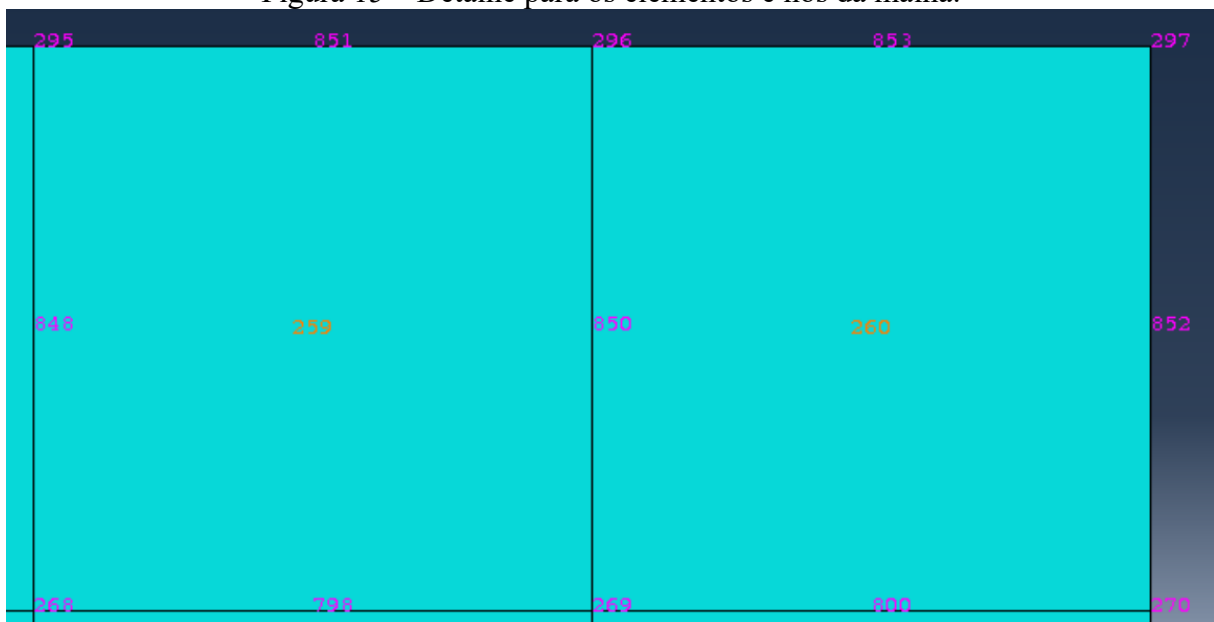
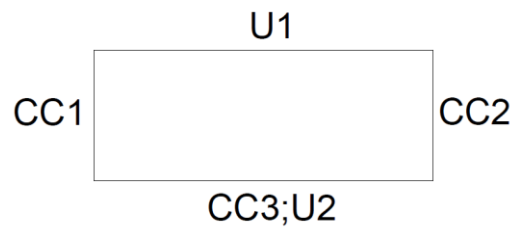


Figura 15 – Detalhe para os elementos e nós da malha.



Para a simulação do ensaio de adensamento no programa foram criadas dois tipos de condições de contorno: condições de contorno física (CC) e de poropressão (U), representadas na Figura 16. O deslocamento horizontal foi impedido nas laterais do corpo de prova identificadas por CC1 e CC2. Em CC3 foram restringidas a deformação horizontal e vertical. Nas porções superior (U1) e inferior (U2) do corpo de prova a poropressão é igual a zero.

Figura 16 – Condições de contorno do corpo de prova.



Fonte: Autora.

A resolução do modelo para obtenção do deslocamento foi realizada em três etapas: inicial, geostática e de consolidação.

A etapa inicial consistiu em definir três parâmetros iniciais do corpo de prova: poropressão, índice de vazios e carga vertical do ensaio. A poropressão hidrostática foi definida como zero. O índice de vazios inicial foi adotado conforme o valor estabelecido em cada análise. A tensão inicial foi definida como 25kPa, e visa representar uma estrutura interna de uma amostra de solo retirada a uma certa profundidade. A aplicação de uma tensão inicial é necessária uma vez que na fase de carregamento a amostra recebe a carga repentinamente. Para o caso da amostra normalmente adensada, o resultado do modelo com tensão inicial nula apresentou uma deformação improvável. Por esse motivo foi colocada uma tensão inicial, que simula uma pressão de 25kPa. Para a caracterização do valor de 25kPa, pode ser considerada uma amostra fictícia com um peso específico de 15kN/m<sup>3</sup> retirada a uma profundidade de 5,0m, com o nível d'água na superfície.

A etapa geostática ofereceu condições iniciais para o modelo. Nessa fase foi aplicada a mesma tensão confinante de 25kPa da etapa inicial para validação do modelo.

A última etapa refere-se ao mecanismo de funcionamento do ensaio de adensamento. A tensão normal aplicada sobre o corpo de prova foi de 400kPa. Essa tensão é usualmente utilizada em um ensaio. Ao observar que o objetivo do modelo era prever magnitude de deformação e não o tempo de consolidação, nesta etapa de cálculo considerou-se que todo incremento de tensão foi transmitido para as tensões efetivas. Além disso, foi definido que a carga variou linearmente durante a etapa de cálculo chamada "adensamento". Com base nesta consideração o carregamento foi transmitido linearmente dentro das fases internas de cálculo (*steps*).

Os dados de entrada dos materiais utilizados no programa constam nas Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 2 – Dados de entrada para o trecho elástico.

<b>Trecho elástico</b>	
<b>Índice de recompressão (<math>\kappa</math>)</b>	0,0203
<b>Coefficiente de Poisson (<math>\nu</math>)</b>	0,3

Tabela 3 – Dados de entrada para o trecho plástico.

<b>Trecho plástico</b>	
<b>Índice de compressão (<math>\lambda</math>)</b>	Distribuição de valores
<b>Inclinação da linha do estado crítico (M)</b>	1,03

Tabela 4 – Dados de entrada da permeabilidade.

<b>Permeabilidade</b>		
<b>Permeabilidade (k)</b>	1,00E-08	m/s
<b>Índice de vazios inicial (e)</b>	Distribuição de valores	

Valores para o índice de vazios e o índice de compressibilidade foram adotados com base nas distribuições estatísticas. Neste caso, para cada nova simulação, um valor distinto destes parâmetros foi adotado. A aplicação do Método Monte Carlo se deu na variação desses dois parâmetros: enquanto o índice de vazios teve variação, o índice de compressão foi mantido constante e o contrário também ocorreu. Assim, a cada simulação foi armazenado o deslocamento do corpo de prova.

Os valores aleatórios inseridos no programa levaram em consideração a curva de distribuição de probabilidade de cada um dos dois parâmetros, índice de vazios inicial e índice de compressão, observados na etapa da análise estatística.. No caso da distribuição normal e log-normal eram necessários também o desvio padrão e a média.

Para a verificação da convergência dos resultados de deslocamento das sucessivas simulações, a cada iteração foi plotado o gráfico que mostra o valor médio dos resultados atualizados a cada nova simulação (iteração). A constatação da estabilização do deslocamento pôde ser observada visualmente. Além disso, ainda foi levado em consideração o indicativo de convergência retirado da bibliografia: para um nível de confiança de 90% e um erro admitido de 0,1, o número de iterações é de duzentas e cinquenta conforme tabela de Baecher e Christian (2003).

## 4 RESULTADOS

A apresentação dos resultados seguirá a ordem descrita na metodologia. Primeiramente está apontada a análise estatística, que divide-se em análise visual dos histogramas gerados e comentários sobre os resultados dos testes realizados.

No subitem 4.3 são comentados os resultados da simulação de variáveis aleatórias na modelagem numérica. A geração de números aleatórios foi feita para o índice de vazios inicial e o índice de compressão. Esses dois parâmetros, são entre outros importantes, pois interferem diretamente no recalque do solo.

### 4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA – ÁREA DE ESTUDO 1

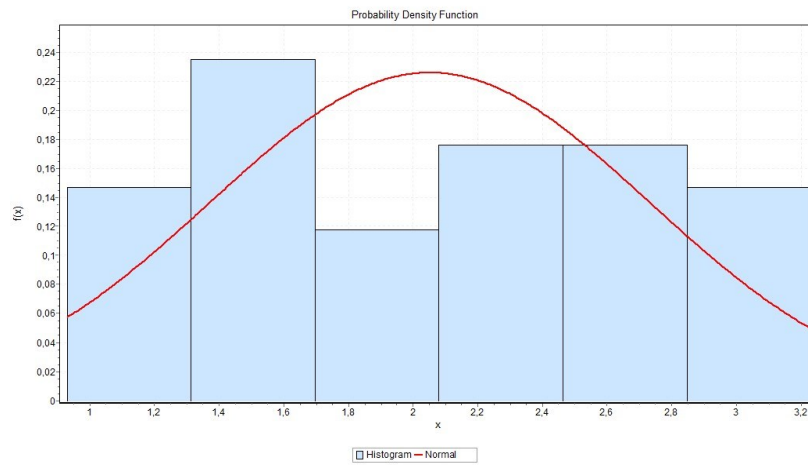
A primeira análise refere-se à área de estudo 1 (municípios de Santa Catarina e Porto Alegre). Primeiramente, serão expostos os gráficos das funções densidade de probabilidade de quatro parâmetros: índice de vazios inicial, índice de vazios inicial parametrizado, tensão de pré-adensamento e índice de compressão. Índice de vazios inicial parametrizado refere-se ao índice de vazios inicial dividido pela tensão efetiva inicial. Isso foi feito como uma tentativa de remover a tendência de diminuição do índice em decorrência de sua profundidade, uma vez que as amostras não foram coletadas nas mesmas profundidades. Dessa forma, serão discutidas as diferenças.

Para a análise visual dos gráficos é necessário compreender que as abscissas correspondem aos dados referentes a cada parâmetro e as ordenadas, à função densidade de probabilidade. Assim, as barras verticais observadas, por exemplo na Figura 17 representam os dados inseridos. A curva em formato de sino presente na mesma Figura 17 equivale a representação de uma distribuição normal caso fossem utilizadas a média e o desvio-padrão dos dados de entrada. Desse modo, a análise visual da adequação será baseada na comparação do histograma com a curva.

A Figura 17 ilustra a função densidade de probabilidade para o índice de vazios inicial. A curva que melhor se adaptou aos dados foi a distribuição normal. Como pode ser observado, o histograma não possui a maior frequência de dados na sua porção central. O histograma também não é simétrico. As colunas verticais acompanham pouco a curva. Desse modo, visualmente a distribuição não seria classificada como normal.



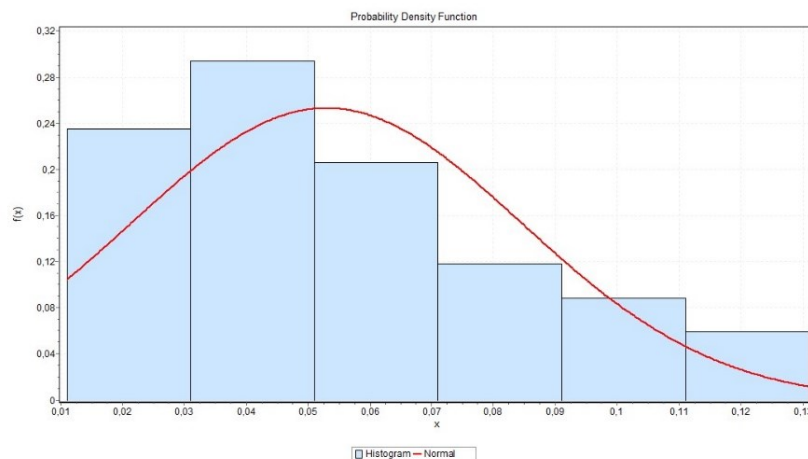
Figura 17 – Distribuição normal para índice de vazios inicial.



A Figura 18 apresenta a função distribuição de probabilidade para o índice de vazios inicial normalizado. Pode ser observado que o pico da curva normal coincide com o pico do histograma. A tendência da curva acompanha o histograma. Apesar das indicações do pertencimento dos dados a uma distribuição normal, o histograma não se mostra totalmente simétrico. Seria necessário ainda uma confirmação segundo os testes estatísticos.

Nota-se que o gráfico da Figura 18 se apresenta com características discrepantes em relação à Figura 17. No entanto, para ambos casos a distribuição mais adequada foi a normal.

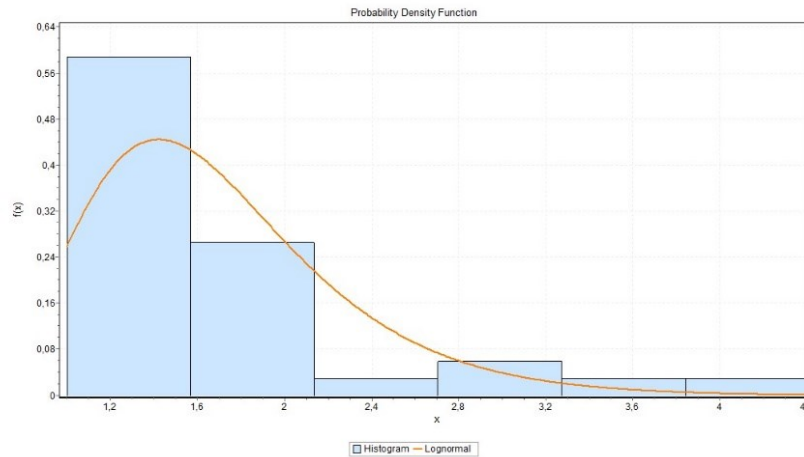
Figura 18 – Distribuição normal para o índice de vazios inicial normalizado.



A Figura 19 contém a função distribuição de probabilidade dos dados de tensão de pré-adensamento e a distribuição log-normal se adequou melhor aos dados de OCR. Pode ser constatado que o histograma segue a tendência da curva, com os picos coincidindo. A assimetria

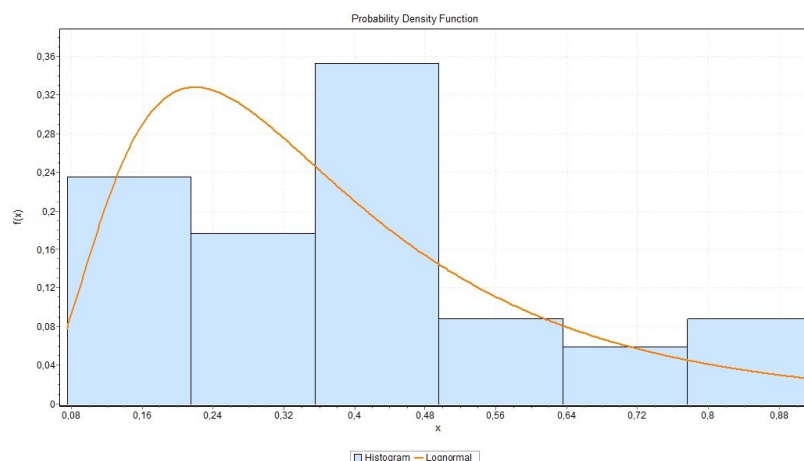
à direita pode ser observada em ambos casos. Para a confirmação da distribuição é necessário assim, uma análise dos testes.

Figura 19 – Distribuição log-normal da razão de pré-adsensamento.



O último parâmetro analisado é o índice de compressão ( $\lambda$ ). A Figura 20 contém o gráfico de sua distribuição. Como pode ser observado, o histograma não acompanha a tendência da curva log-normal. O pico do histograma não coincide com o da curva log-normal, não há uma tendência do histograma a apresentar uma assimetria à direita assim, como a curva. Portanto, visualmente a distribuição da compressão não seria considerada log-normal.

Figura 20 – Distribuição log-normal do índice de compressão.



Concluída a análise visual, essa é complementada com a análise chamada numérica, que leva em consideração a avaliação dos testes das distribuições apresentados *no software EasyFit*.

No Quadro 1 é possível observar os resultados dos testes de adequação obtidos para cada um dos parâmetros do solo da área de estudo 1. O tamanho da amostra para os quatro

parâmetros foi igual a 34. Esse valor é maior do que o menor tamanho de amostra (30) recomendado para análise estatística, segundo a literatura.

Quadro 1 – Resumo dos valores obtidos para a análise estatística da área de estudo 1.

	Distribuição identificada	Anderson-Darling		Kolmogorov-Smirnov		Qui-Quadrado		Shapiro-Wilk	
		Classificação	Estatística	Estatística	Valor-P	Estatística	Valor-P	Estatística	Valor-P
Índice de Vazios Inicial	Normal	10º lugar	0,37207	0,10524	0,80813	0,55278	0,90715	0,95965	0,2375
Índice de Vazios Inicial Normalizado	Normal	19º lugar	0,40912	0,09623	0,88153	0,87464	0,92817	0,94938	0,1177
OCR	Lognormal	20º lugar	1,2598	0,17949	0,19784	4,9363	0,17652	-	-
Índice de Compressão	Lognormal	30º lugar	0,62552	0,14497	0,43178	3,4122	0,49136	-	-

Os dados de índice de vazios foram caracterizados como pertencentes a uma distribuição normal. A classificação dessa distribuição no *software* ficou em 10ª colocação, o que representa uma boa posição ao considerar que há quase 50 distribuições que foram testadas. A estatística de Anderson-Darling para esse parâmetro indica um bom resultado, pois se apresentou-se próximo a zero. O teste Shapiro-Wilk (S-W), teste que melhor atesta a normalidade, segundo a literatura, também apresentou bom resultado, pois seu valor é próximo de um.

Com o nível de significância adotado de 10%, o valor-P do teste de S-W seria maior do que o adotado ( $0,10 < 0,2375$ ), a hipótese inicial de que os dados se adequam a uma distribuição não poderia ser rejeitada.

O segundo parâmetro analisado, o índice de vazios inicial normalizado do Quadro 1 refere-se a um índice de vazios inicial dividido pela tensão vertical efetiva inicial. Isso foi analisado para verificar se havia mudança de comportamento estatístico caso a tendência dos dados fosse removida. Pode ser observado, que a distribuição que melhor se adequou aos dados permaneceu a normal. A posição dessa distribuição na classificação do programa ficou inferior, seu teste de Anderson-Darling também aumentou, o que o torna mais distante do ideal. No

entanto para o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S), por exemplo, a distribuição seria mais adequada em comparação com a anterior. Para S-W a maior variação foi em seu valor-P. Entretanto, mantendo o nível de significância em 10%, ainda assim a distribuição seria aceita como normal.

O terceiro parâmetro do Quadro 1 é a razão de pré-adensamento. A distribuição que melhor se adequou aos dados foi a log-normal. Na classificação segundo o teste de Anderson-Darling (A-D), sua posição é no 20º lugar. Apesar de a estatística de A-D ser alta, na estatística de K-S ela é baixa e segundo seu valor-P, a hipótese inicial não poderia ser descartada. A estatística de Qui-Quadrado (Q-Q) é alta e seu valor-P, também para um nível de significância adotado de 10%, a log-normal não poderia ser descartada.

Por fim, o último parâmetro analisado foi o índice de compressão. Os dados desse parâmetro se adequaram melhor à distribuição log-normal. A posição que ela ocupa na classificação das distribuições é a 30ª. A estatística de A-D e Q-Q resultaram altas. O teste de K-S também resultou alto se for comparado com os resultados dos outros parâmetros. Ainda assim, os valores-P indicam que a hipótese do índice de compressão se adequar a uma distribuição log-normal não deve ser descartada.

Diante das análises tanto visuais quanto numéricas, chegou-se aos seguintes resultados:

- (i) para o índice de vazios inicial não houve uma boa aderência do histograma com a curva normal. Apesar disso, os testes apresentaram resultados satisfatórios. Assim, considerou-se que o índice de vazios apresenta distribuição normal;
- (ii) no caso do índice de vazios inicial normalizado, a análise visual indicou uma possível aderência à curva normal. Como os resultados dos testes indicaram a não rejeição da hipótese da distribuição normal, concluiu-se que a curva representa os dados;
- (iii) o terceiro parâmetro analisado foi a razão de pré-adensamento. Assim como a análise visual indicou uma distribuição log-normal dos dados, a análise numérica resultou em uma não rejeição da hipótese inicial;
- (iv) o último parâmetro analisado foi o índice de compressão. Nesse caso, a curva não se mostrou adequada a representar os dados e os testes resultaram em valores superiores quando comparados com os testes dos

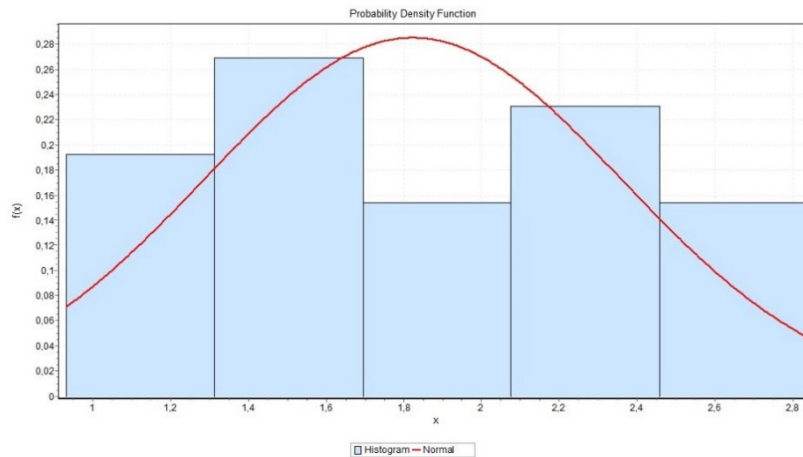
outros parâmetros. Nesse caso os dados de índice de compressão não pertencem a uma distribuição log-normal.

## 4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA – ÁREA DE ESTUDO 2

A segunda análise estatística refere-se aos dados exclusivamente dos municípios de Santa Catarina. Assim como no subitem 4.1 serão expostos primeiramente os gráficos das funções densidade de probabilidade. Nesse caso, além dos parâmetros do ensaio analisados anteriormente, será discutida a distribuição do índice de recompressão. Como descrito também no subitem anterior, as abscissas correspondem aos dados referentes a cada parâmetro e as ordenadas, à função densidade de probabilidade.

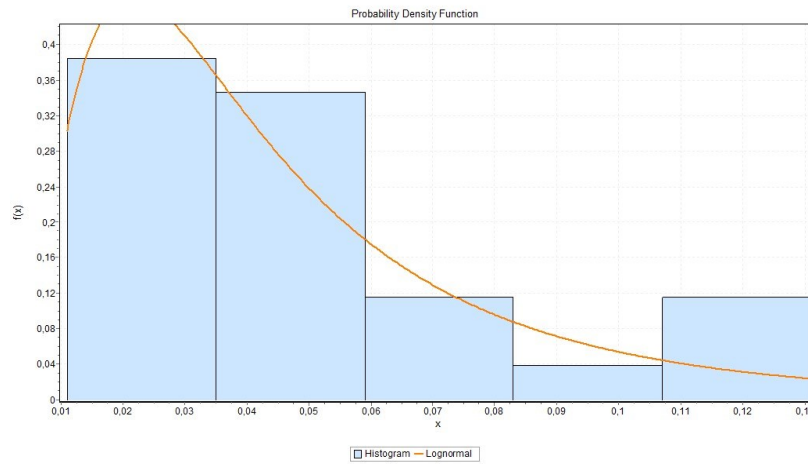
A Figura 21 apresenta a função densidade de probabilidade do índice de vazios inicial. O histograma dos dados de índice de vazios inicial também foi apresentado. É possível notar que apesar das colunas verticais serem simétricas, a coluna do meio não apresenta a maior frequência de dados. Mesmo assim, é perceptível a mesma tendência da curva e do histograma.

Figura 21 – Distribuição normal para índice de vazio inicial.



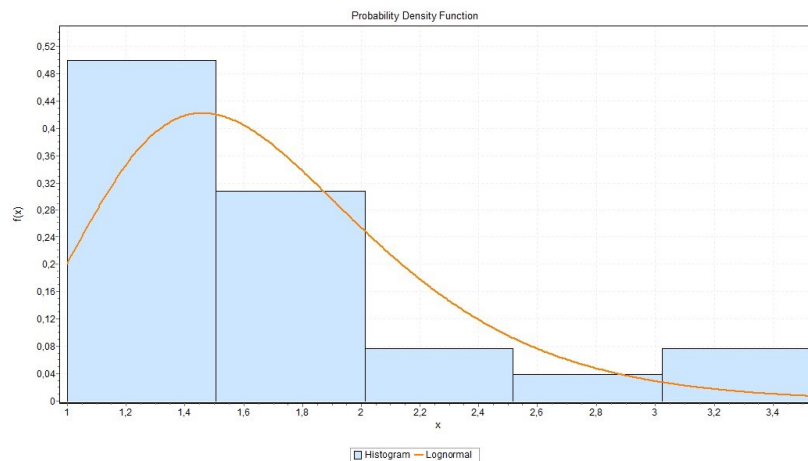
A Figura 22 apresenta a distribuição dos dados de índices de vazios inicial normalizado como log-normal. Apesar de a última coluna do histograma estar um pouco acima da curva log-normal, a tendência dos dois elementos pode ser considerada a mesma. Nessa região estudada pode ser observado que as funções densidade de probabilidade foram distintas para o índice de vazios inicial e o índice de vazios normalizado.

Figura 22 – Distribuição log-normal para índice de vazio inicial normalizado.



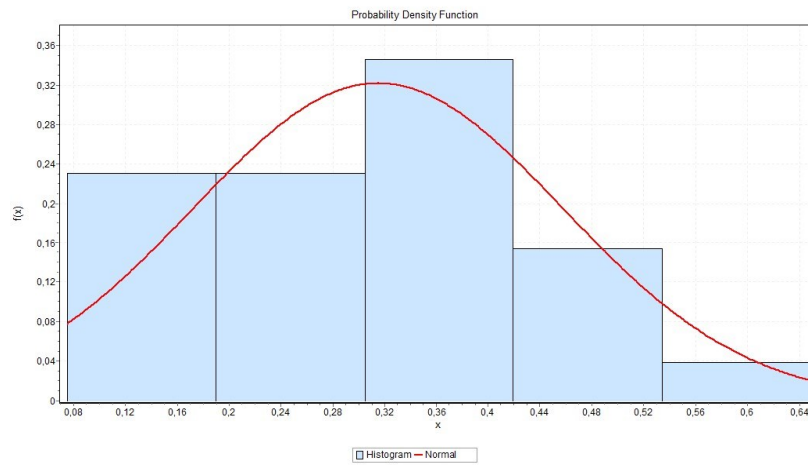
O terceiro parâmetro analisado foi a razão de pré-adensamento. A Figura 23 ilustra o histograma dos dados e a função densidade de probabilidade log-normal. Pode-se observar que a assimetria à direita ocorre em ambos casos. Para a confirmação da adequação da distribuição é necessário assim, uma análise dos testes.

Figura 23 – Distribuição log-normal para razão de pré-adensamento.



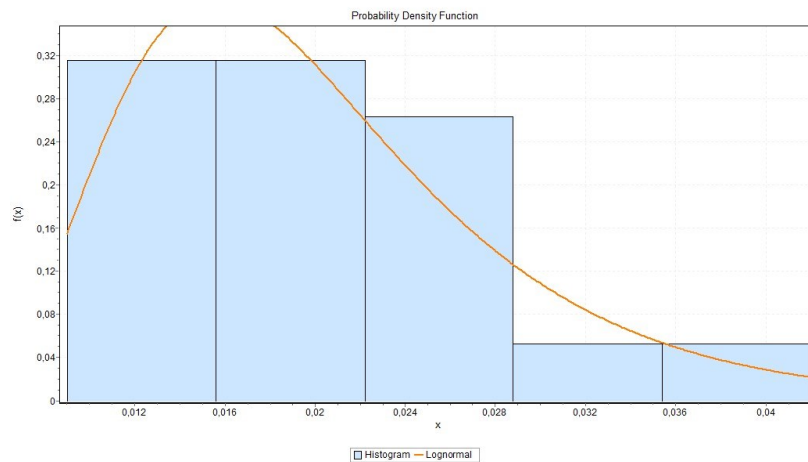
A Figura 24 contém a distribuição normal dos dados de índice de compressão ( $\lambda$ ). A maior densidade de dados situa-se ao centro tanto no histograma quanto na curva da função. Além disso, pode-se observar a mesma tendência dos dois elementos. Para a confirmação da adequação da distribuição normal dos dados, deve ser feita a análise conjunta com os testes.

Figura 24 – Distribuição normal para índice de compressão.



O último parâmetro analisado para a região litorânea do Estado de Santa Catarina é o índice de recompressão. A Figura 25 contém o gráfico da função densidade de probabilidade log-normal desse parâmetro. A tendência da curva da função pode ser percebida no histograma. No entanto, assim como para os outros parâmetros, para essa confirmação devem ser analisados os testes.

Figura 25 – Distribuição log-normal do índice de recompressão.



O Quadro 2 apresenta os resultados dos testes para cada parâmetro do solo. O tamanho da amostra para o índice de vazios inicial, índice de vazios normalizado, razão de pré-adensamento e índice de compressão é de 26. Por outro lado, para o índice de recompressão é de apenas 19, pois foram obtidos dados de índice de compressão apenas do trecho da BR-470.

Quadro 2 – Resumo dos testes obtidos para a área de estudo 2.

	Distribuição identificada	Anderson-Darling		Kolmogorov-Smirnov		Qui-Quadrado		Shapiro-Wilk	
		Classificação	Estatística	Estatística	Valor-P	Estatística	Valor-P	Estatística	Valor-P
Índice de Vazios Inicial	Normal	5º Lugar	0,30674	0,11245	0,86124	0,94836	0,6224	0,96571	0,516
Índice de Vazios Inicial Normalizado	Log-normal	17º Lugar	0,43299	0,12093	0,7986	0,03131	0,98446	-	-
OCR	Log-normal	18º Lugar	0,68532	0,14999	0,55217	2,09741	0,5531	-	-
Índice de Compressão	Normal	4º Lugar	0,46077	0,12421	0,77221	2,4711	0,29067	0,95684	0,3333
Índice de Recompressão	Log-normal	17º Lugar	0,28439	0,10644	0,96664	0,994	0,60835	-	-

A partir dos resultados do Quadro 2, verifica-se que os dados de índice de vazios inicial foram classificados como ajustados à distribuição normal. Diante de todas as funções submetidas aos testes, a função normal se encontrou na quinta posição. Além disso, tanto a estatística do teste de Anderson-Darling (A-D) quanto a de Shapiro-Wilk (S-W) resultaram em valores próximos ao desejado (0 e 1 respectivamente).

O índice de vazios inicial normalizado foi classificado como log-normal. Sua posição no ranking em comparação com outras funções densidade de probabilidade encontra-se em 17ª colocação. O resultado da estatística de A-D é maior do que quando comparada com o valor do parâmetro anterior, o que a torna mais distante do valor ideal (0). Os testes estatísticos para Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Qui-Quadrado (Q-Q) encontram-se próximos a 0, valores que indicam que é possível que a distribuição adequada seja a log-normal.

O terceiro parâmetro apresentado no Quadro 2 é a razão de pré-adensamento. No *ranking* de funções densidade de probabilidade, a adequação dos dados à distribuição log-normal ficou na 18ª colocação. A estatística de A-D obteve um valor igual a 0,68, maior valor para esse teste no Quadro 2. Além desse, o teste de Q-Q também foi o mais elevado. Isso pode indicar um ajuste impróprio à distribuição log-normal, pois para a melhor adequação dos dados, os testes deviam apontar valores inferiores.

O quarto parâmetro do Quadro 2 é o índice de compressão, que apresentou uma distribuição normal. O teste S-W resultou próximo a 1, valor que representa um bom ajuste dos dados. Seu valor-P também se mostra favorável à aceitação da hipótese de que os dados se adequam à distribuição normal ( $0,33 > 0,1$ ).

O último parâmetro avaliado foi o índice de recompressão, que apresentou distribuição log-normal. Pode-se observar que apesar de sua colocação no *ranking* ter sido igual a 17ª, a



estatística de A-D é a de menor valor no Quadro 2. O teste de K-S também apresentou resultados próximos à 0 e além disso, o valor-P encontra-se acima do nível de significância adotado. Essas informações indicam uma não rejeição da hipótese inicial de considerar a distribuição log-normal.

Diante das análises tanto visuais quanto numéricas, chegou-se aos seguintes resultados:

- (i) para o índice de vazios inicial o histograma não apresentou o seu valor mais alto na coluna central. Ainda assim, apresentou uma simetria e a mesma tendência da curva da função e do histograma. O resultado dos testes confirmaram o indicativo da análise visual de da adequação dos dados a uma distribuição normal. Assim, concluiu-se que a hipótese inicial não pode ser rejeitada;
- (ii) no caso do índice de vazios inicial normalizado, a análise visual indicou um provável ajuste da distribuição log-normal, assim como a análise dos testes. Portanto conclui-se que a função densidade de probabilidade adequada foi log-normal;
- (iii) o terceiro parâmetro analisado foi a razão de pré-adensamento. A análise visual indicou a possibilidade da adequação dos dados à função densidade de probabilidade. No entanto, os resultados obtidos nos testes, apesar de expressarem a não rejeição da hipótese, apresentaram-se distantes dos valores desejados. Dessa forma, conclui-se que a razão de pré-adensamento não apresenta uma função densidade de probabilidade normal;
- (iv) a análise visual do índice de compressão, assim como a análise numérica foi favorável à aceitação da hipótese inicial. Assim, considerou-se que o parâmetro segue a distribuição normal;
- (v) o último parâmetro analisado foi o índice de recompressão apesar da análise visual dos dados não apresentar resultados satisfatórios, os resultados dos testes indicaram um bom ajuste da função densidade de probabilidade log-normal. Portanto considera-se que o parâmetro segue essa distribuição.

### 4.3 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

Para a análise do modelo no *software* Abaqus foi realizada a variação apenas do índice de vazios inicial e do índice de compressão, parâmetros que interferem diretamente na magnitude do recalque do solo. Considerou-se um material normalmente adensado e não havendo estatística do ângulo de atrito, foi adotado um valor constante para este parâmetro. No caso do índice de recompressão, foi inserido o valor médio obtido na análise estatística.

#### 4.3.1 Análise da variação do índice de vazios inicial

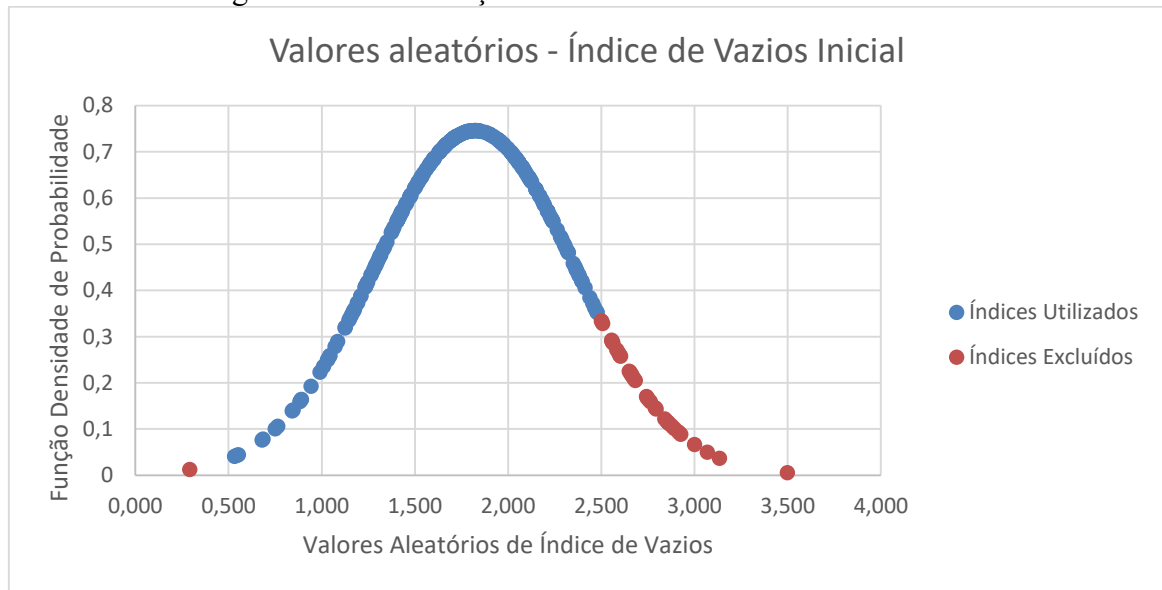
A primeira análise compreendeu a variação aleatória do índice de vazios inicial, nesse caso, razão de pré-adensamento, ângulo de atrito, índice de recompressão foram mantidos constantes. Para o índice de compressão, foi utilizado o valor médio obtido pela análise estatística. Como pode ser observado no subitem 4.2, a distribuição de índice de vazios inicial se adequou a distribuição normal. Sua média foi de 1,822 e desvio padrão igual a 0,535, o que resultou em um coeficiente de variação (Cov) de 29,4%.

Os resultados da estatística para o índice de vazios (distribuição normal, desvio padrão de 0,535, e média 1,822) foram utilizados para geração de valores aleatórios. Utilizou-se o *software* Excel nesta fase.

A função densidade de probabilidade obtida através da geração de números aleatórios do índice de vazios inicial consta na Figura 26. O seu limite inferior foi próximo de 0,500 e o superior, de 2,500. Esses valores foram definidos a partir da porosidade do solo. Como valor mais baixo definiu-se 30% de porosidade, o que acarreta em um índice de vazios de aproximadamente 0,500. Como valor máximo definiu-se 70%, que tem como consequência o parâmetro próximo a 2,500. Esses limites foram impostos também pela necessidade de convergência do modelo no *software*. Para a aceitação de valores além desses limites faz-se necessário um aumento da tensão confinante adotada (25KPa), que acarretou em um aumento na estrutura interna do solo.

Na Figura 26 estão ilustrados em azul os duzentos e cinquenta pontos de índices de vazios iniciais que foram utilizados na modelagem. Em vermelho constam os parâmetros que foram gerados aleatoriamente, porém por causa das limitações acima destacadas, não foram utilizados no *software*.

Figura 26 – Distribuição normal do índice de vazios inicial.



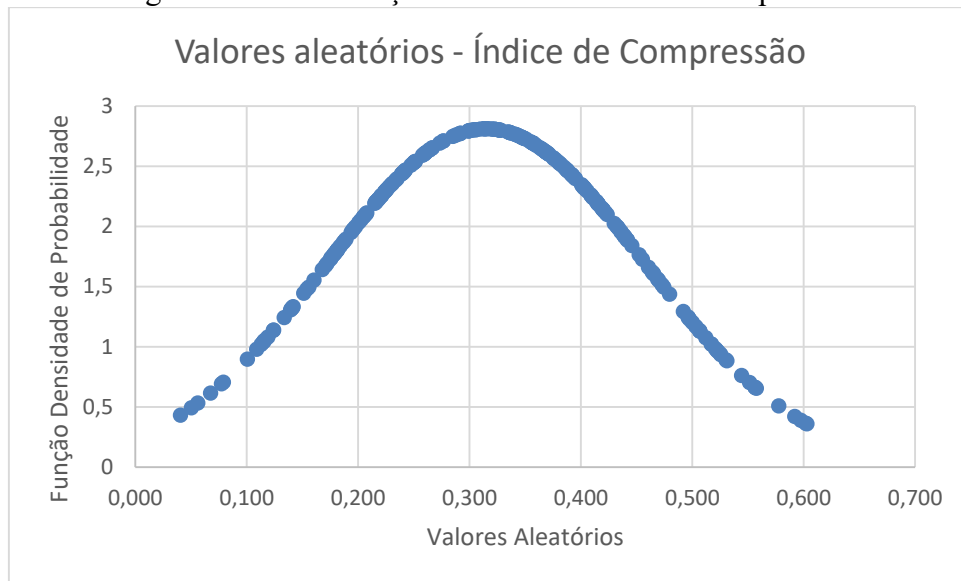
#### 4.3.2 Análise da variação do índice de compressão

A segunda análise compreendeu a variação do índice de compressão, nesse caso, razão de pré-adensamento, ângulo de atrito, índice de vazios foram mantidos constantes.

Para a variação do índice de compressão foi verificado que este parâmetro pode ser representado por uma distribuição normal com média igual a 0,315 e desvio padrão igual a 0,142. Como consequência, o coeficiente de variação (Cov) foi de 45%. A curva com os valores aleatórios, gerados a partir dos parâmetros estatísticos, pode ser observada na Figura 27.

Outro dado que pode ser notado na Figura 27 é o intervalo de valores para o índice de compressão. O mínimo utilizado foi 0,040 e o máximo, 0,600. Esses valores foram impostos pelo limite da própria deformação do solo. Parâmetros muito altos fazem com que a deformação seja muito alta e valores baixos causam uma deformação baixa. Novamente, para a utilização de valores externos a esses limites, foi necessário aumentar a tensão confinante do solo.

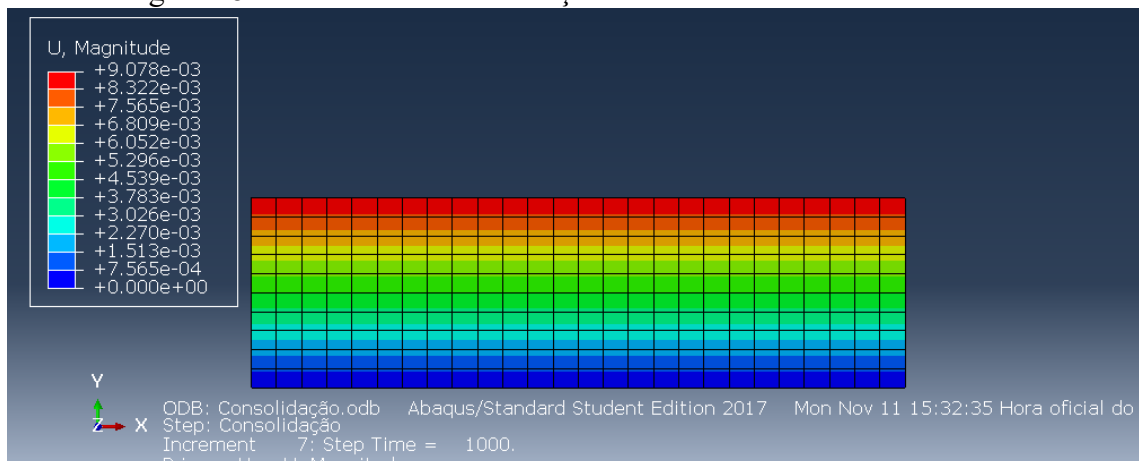
Figura 27 – Distribuição normal do índice de compressão.



### 4.3.3 Apresentação dos resultados

A partir dos dados descritos nos subitens 4.3.1 e 4.3.2, foram realizadas as simulações no *software* Abaqus. Um dos resultados possíveis do programa é ilustrado pela Figura 28. Nela pode-se identificar o corpo de prova com a malha quadricular em diversas cores. Cada cor indica a uma magnitude de deslocamento. A cor vermelha indica um maior deslocamento e a azul escura, um deslocamento nulo. Esse é um indício de que o modelo possui coerência, pois o corpo de prova em sua parte inferior é impedido de se deslocar. Também é possível visualizar na imagem os valores de cada intervalo de deslocamento.

Figura 28 – Resultado de deformação do modelo em elementos finitos.



Assim, a cada alteração de um valor de índice de vazios ou índice de compressão foi obtido um resultado como o da Figura 28 e então armazenado o valor do deslocamento. Para cada nova simulação, além do valor do deslocamento armazenado foi atualizado o valor médio do recalque obtido pelas simulações. A estabilização do valor médio de recalques indicou a convergência do método. Após a convergência realizou-se a análise da estatística dos resultados obtidos pela simulação. Essa análise estatística simulou a verificação da adequação dos resultados a distribuições de deslocamento.

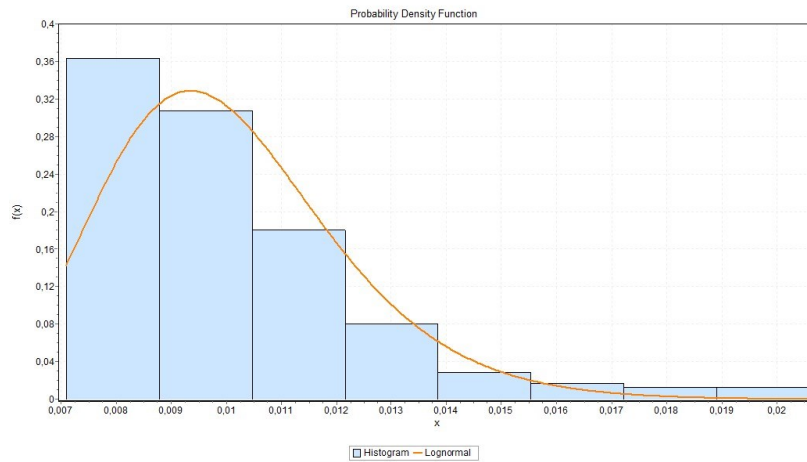
A Figura 29 ilustra a convergência do valor do deslocamento do corpo de prova a cada índice de vazios alterado no programa. Assim, após as 250 iterações pode-se dizer que o deslocamento médio na região é de 1,00cm.

Figura 29 – Convergência do deslocamento para variação do índice de vazios.



Outro resultado que pode ser obtido são as probabilidades de ocorrência de deslocamentos. Para isso, foram realizados testes de distribuições. A função que melhor se adequou aos dados foi a log-normal, que pode ser observada na Figura 30. Aparentemente, a tendência da curva é seguida pelo histograma, no entanto, quando analisados os testes de adequação, é verificado que não se trata de uma função densidade de probabilidade log-normal. O teste de Anderson-Darling resultou em 3,5 e o valor-P tanto para o teste de Kolmogorov-Smirnov quanto para Qui-Quadrado ficaram abaixo do nível de significância adotado de 0,1 (0,02 para K-S e 0,09 para Q-Q).

Figura 30 – Distribuição log-normal dos deslocamentos (variação índice de vazios).



Dessa forma, foi adotada outra metodologia para a obtenção da probabilidade. Foi verificada a probabilidade de ocorrência de deformações acima do valor médio obtido na convergência do método Monte Carlo. No caso da variação do índice de vazios inicial, esse valor é de 1,0cm. Com base na contagem de deslocamentos acima de certo valor em relação à quantidade total de dados, é possível obter uma probabilidade. Dessa forma, foram verificadas as probabilidades para deslocamentos estipulados em 15%, 35% e 50% maiores do que 1,00cm ocorrerem, como consta na Tabela 5.

A probabilidade de ocorrer um deslocamento 15% maior do que 1,00cm (1,15cm) é de 20,4%. Essa porcentagem sofreu uma variação pequena no segundo valor estipulado: a probabilidade de um deslocamento maior que 1,20cm ocorrer é de 16,0%. Finalmente, a probabilidade de ocorrer um deslocamento 35% maior que a média é de 8,4%.

Tabela 5 – Probabilidade de ocorrência de deslocamentos.

<b>Deslocamento maior que a média</b>	<b>Probabilidade de Ocorrência</b>
15%	20,4%
20%	16,0%
35%	8,4%

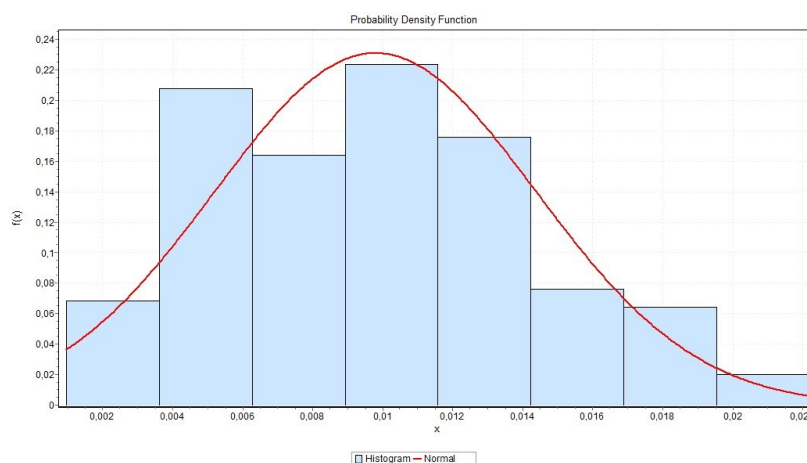
No caso da variação aleatória do índice de compressão, a análise da convergência é apresentada no gráfico da Figura 31. Pode-se observar que ao final das iterações o deslocamento ainda variou significativamente o que causou uma definição imprecisa da convergência. Apesar disso, a média dos valores foi adotada como 0,97cm.

Figura 31 – Convergência do deslocamento para a variação do índice de compressão.



Os resultados dos deslocamentos obtidos segundo a variação do índice de compressão foram submetidos aos testes conforme a distribuição normal. A Figura 32 compara a curva obtida pela equação a partir da média e do desvio padrão dos dados e o histograma de densidade. Pode-se notar a semelhança de ambos e a mesma tendência dos dois elementos. No entanto, no *ranking* das distribuições, a normal está com a 29ª colocação. Além disso, a estatística de Anderson-Darling está com o valor de 1,25, acima do valor desejável para a aceitação da hipótese. Apesar disso, o teste de Shapiro-Wilk resultou em 0,97, em que o desejável é obter valores próximos de 1. No entanto, seu valor-P é igual a 0,00077 e é abaixo de 0,1. Foi sugerido que a hipótese inicial de que o deslocamento segue uma distribuição normal seja rejeitada.

Figura 32 – Distribuição normal dos deslocamentos para a variação do índice de compressão.



Como não foi possível obter uma probabilidade de deslocamento pela distribuição normal, prossegue-se com a mesma metodologia utilizada no cálculo da probabilidade de

ocorrência dos deslocamentos devido à variação do índice de vazios. No entanto, os deslocamentos para esse caso diferem dos apresentados anteriormente: os valores utilizados foram 15%, 35% e 50% (como consta na Tabela 6). Essa alteração sucedeu-se para maior intervalo entre as probabilidades de ocorrência. Ressalta-se que no caso da variação do índice de compressão, o valor médio é igual a 0,97cm.

Tabela 6 – Probabilidade de ocorrência de deslocamentos.

<b>Deslocamento maior que a média</b>	<b>Probabilidade de Ocorrência</b>
15%	36,0%
35%	22,0%
50%	15,2%

A partir da Tabela 6, nota-se que a probabilidade de ocorrer um deslocamento 15% maior que 0,97cm é de 36,0%. A probabilidade permanece elevada para deslocamentos 35% maiores que o médio (1,31cm): 22,0%. Por fim, o último valor submetido aos testes foi 50% maior que a média e nesse caso há uma probabilidade de 15,2% de ocorrência.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo são apresentadas as considerações acerca dos resultados, sob a forma de conclusões, bem como as necessidades de abrangência de detalhamentos para a continuidade da pesquisa, sob a forma de sugestões.

### 5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo caracterizar a variabilidade de solos argilosos da região litorânea de Santa Catarina, além de aplicar essa variabilidade em um modelo de elementos finitos para o ensaio de adensamento.

Inicialmente foi realizada uma análise estatística de quatro parâmetros do solo: índice de vazios inicial, razão de pré-adensamento (OCR), índice de compressão ( $\lambda$ ) e índice de recompressão ( $\kappa$ ). Essa análise foi dividida em duas: a primeira, visual e a segunda, numérica. Notou-se que a primeira análise apresentou a desvantagem de ser subjetiva. Os testes apareceram para oferecer maior objetividade nas confirmações das hipóteses, mas muitas vezes se contradizem quando comparados. Mesmo quando coincidem, não há valores certos da indicação de adequação de uma distribuição. Assim, é necessária cautela na declaração de uma função densidade de probabilidade.

Uma observação que deve ser feita é que para uma análise estatística aprimorada eram necessários mais dados de uma mesma região. O tamanho amostral dos parâmetros do litoral de Santa Catarina não atingiu o mínimo recomendado pela literatura - 30. Seriam necessários mais dados da mesma região para uma análise mais embasada e completa. Além disso, como as análises estatísticas de parâmetros do solo necessitam de elevada quantidade de resultados de ensaios, percebe-se a necessidade de um banco de dados nacional para melhor compreensão da variabilidade do solo.

Em um segundo momento, foi aplicado o Método Monte Carlo para o índice de vazios e o índice de compressão. Esses parâmetros foram variados aleatoriamente no *software* Abaqus de elementos finitos, enquanto que os outros parâmetros necessários para o modelo elasto-plástico Cam-clay permaneciam inalterados com suas médias. Logo, pôde-se analisar individualmente a influência que cada um dos dois parâmetros possui no deslocamento.

Em relação ao resultado da análise numérica, buscou-se inicialmente caracterizar as distribuições dos deslocamentos como normal ou log-normal. Como isso não foi possível,

adotou-se uma metodologia mais simples para a obtenção da probabilidade de ocorrência de deslocamentos acima da média encontrada pela convergência do MMC.

É necessário fazer uma ressalva quanto à convergência dos deslocamentos obtidos a partir do índice de compressão. A convergência não ficou muito clara. Pode-se perceber que o deslocamento variou entre 0,9cm e 1,0cm mesmo ao final das iterações. Para resultados mais exatos seria preciso realizar mais iterações, ou seja, gerar mais valores aleatórios de índice de compressão, alterar no modelo de elementos finitos e plotar no gráfico. Dessa forma poderá ser notada uma convergência mais aproximada do valor médio do deslocamento.

Por fim, pôde ser constatado, que foi elevada a probabilidade de ocorrência de deslocamentos verticais acima da média encontrada para os dados da área de estudos. Essa demonstração é comprovada em obras de engenharia quando observa-se recalques elevados onde muitas vezes são adotados valores médios de parâmetros geotécnicos para regiões amplas. Como comentado na Seção 1, investigações geotécnicas insuficientes ou mesmo interpretações errôneas podem levar a um projeto errado e, conseqüentemente maiores custos.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nos itens abaixo são apresentadas sugestões para trabalhos futuros:

- No trabalho como um todo foi analisado somente a magnitude dos deslocamentos no corpo de prova durante o ensaio de adensamento. Sugere-se uma análise do tempo em que as deformações ocorrem, portanto uma análise da permeabilidade do solo;
- Sugere-se a variação simultânea do índice de vazios inicial e do índice de compressão no modelo de elementos finitos para observação do comportamento do solo;
- Aplicar o Método Monte Carlo para os demais parâmetros: índice de recompressão, razão de pré-adensamento (OCR) e inclinação da projeção da linha do estado crítico (M). Aplicar no modelo em elementos finitos para comparação da influência das deformações;
- Criar um modelo em elementos finitos de uma seção estratigráfica real para avaliação da deformação real do solo em campo.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **12007: Solo - Ensaio de adesamento unidimensional - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: Xx, 1990. 15 p.
- BAECHER, G. B.; CHRISTIAN, J. T. **Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering**. Chichester,UK: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- BIELEFELDT, V. et al. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **Clinical & Biomedical Research**, v. 32, n. 2, p. 227–234, 2012.
- BUDHU, M. Design of shallow footings on heavily overconsolidated clays. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 49, n. 2, p. 184–196, 2012.
- CHRISTIAN, J. T. Geotechnical Engineering Reliability: How Well Do We Know What We Are Doing? **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 10, p. 985–1003, out. 2004.
- D’AGOSTINO, R. B.; STEPHENS, M. A. Goodness-of-fit techniques,. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 68, n. 1, p. 589, 1986.
- DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística : para engenharia e ciências**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2006.
- FISHMAN, G. S. **Monte Carlo: concepts, algorithms and applications**. Nova York: Springer-Verlag, 1995.
- GRANDO, Â. **Propriedades e Parâmetros Geotécnicos de Depósitos com Argilas Moles de Santa Catarina**. 2018. 807p. Tese (Doutorado em Infraestrutura e Gerência Viária), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil-PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, Brasil, 2018.
- HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. **Monte Carlo Methods**. 4. ed. London, UK: Methuen’s 5 Monographs on Applied Probability and Statistics, 1964.
- HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An Introduction to Geotechnical Engineering**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1981.
- LACASSE, S.; NADIM, F. Risk and reliability in geotechnical engineering. **International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 1162–1192, 1998.
- LAZO, P. P. D. Monte Carlo para problemas determinísticos: sistemas lineares. v. 04, n. 2, p. 1–8, 2009.
- OLIVEIRA, H. M. de. **Comportamento de aterros reforçados sobre solos moles levados à ruptura**. 2006. UFRJ, 2006.
- PHOON, K.-K.; CHING, J. **Risk and reliability in geotechnical engineering**. [s.l.] Press, CRC, 2014. v. 9
- RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**, v. 2, n. 1, p. 21–33, 2011.

ROSCOE, K. .; BURLAND, J. . On the generalised stress-strain behavior of “wet clay”. in **J. Heyman and F.A. Leckie (eds.) Engineering plasticity (Cambridge: Cambridge University Press, p. 535–609, 1968.**

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591–611, 1965.

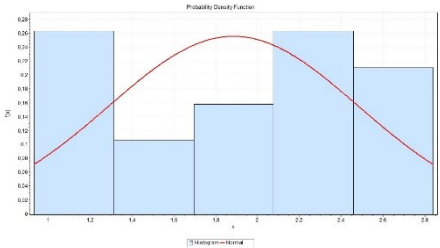
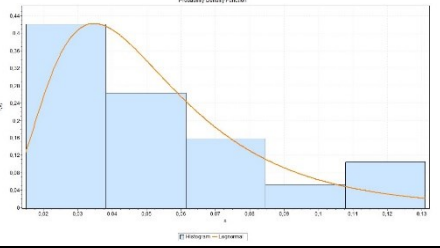
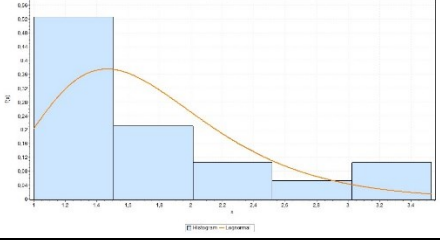
US ARMY CORPS OF ENGINEERS. Geotechnical investigations [EM 1110-1-1804]. n. January, 2001.

WOOD, D. M. **Soil behaviour and critical state soil mechanics**. [s.l.] Cambridge university press, 1990.

## APÊNDICE A

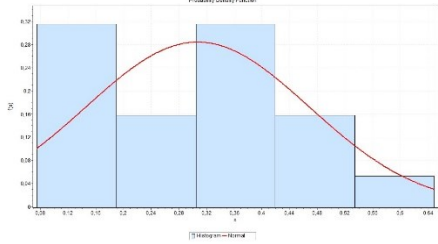
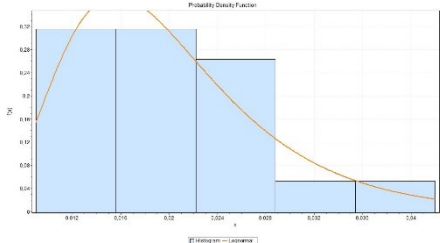
A Tabela 7 demonstra as curvas de distribuição que foram submetidas aos testes para os parâmetros apenas da BR-470. O tamanho amostral desses dados é de apenas 19. Esse valor situa-se abaixo do recomendável para uma análise estatística (30). Além disso, pela análise visual, apenas a curva log-normal do índice de vazios inicial normalizado segue a mesma tendência do histograma. Dessa forma, optou-se por apenas tentar ilustrar a análise estatística e não realizar testes para as amostras.

Tabela 7 – Simulação de distribuições dos parâmetros da BR-470.

<b>CARACTERIZAÇÃO DA BR-470</b>		
<b>Parâmetros</b>	<b>Função Densidade de Probabilidade</b>	<b>Gráfico - FDP</b>
Índice de Vazios Inicial	Normal	
Índice de Vazios Inicial Normalizado	Log-Normal	
Razão de Pré-Adensamento	Log-Normal	

Continuação da Tabela 7.

**CARACTERIZAÇÃO DA BR-470**

Parâmetros	Função Densidade de Probabilidade	Gráfico - FDP
Índice de Compressão	Normal	 <p>The graph shows a histogram of the Compressibility Index (Índice de Compressão) with a normal distribution curve overlaid. The x-axis represents the index value, ranging from 0.08 to 0.64 with increments of 0.04. The y-axis represents the probability density function (PDF), ranging from 0 to 0.10 with increments of 0.02. The histogram bars are light blue, and the normal curve is a solid red line. The distribution is roughly bell-shaped and centered around 0.32.</p>
Índice de Recompressão	Log-Normal	 <p>The graph shows a histogram of the Recompression Index (Índice de Recompressão) with a log-normal distribution curve overlaid. The x-axis represents the index value, ranging from 0.012 to 0.24 with increments of 0.012. The y-axis represents the probability density function (PDF), ranging from 0 to 0.10 with increments of 0.02. The histogram bars are light blue, and the log-normal curve is a solid orange line. The distribution is right-skewed, with a peak around 0.012 and a long tail extending towards 0.24.</p>