



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Natália Ziesmann

**Análise probabilística utilizando campos aleatórios aplicada à estabilidade de aterros
sobre solos moles**

Florianópolis

2023

Natália Ziesmann

**Análise probabilística utilizando campos aleatórios aplicada à estabilidade de aterros
sobre solos moles**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do título de Mestre em En-
genharia Civil.

Orientadora: Profa. Gracieli Dienstmann, Dra.

Florianópolis

2023

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

Ziesmann, Natália

Análise probabilística utilizando campos aleatórios
aplicada à estabilidade de aterros sobre solos moles /
Natália Ziesmann ; orientadora, Gracieli Dienstmann, 2023.
135 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Campos aleatórios. 3.
Estabilidade de taludes. 4. Análise probabilística. 5.
Modelo numérico. I. Dienstmann, Gracieli. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

Natália Ziesmann

**Análise probabilística utilizando campos aleatórios aplicada à estabilidade de aterros
sobre solos moles**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora
composta pelos seguintes membros:

Prof. Nilo Cesar Consoli, Dr.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Rafael Holdorf Lopez, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado
para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Profa. Gracieli Dienstmann, Dra.
Orientadora

Florianópolis, 2023.

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido Anderson. Realizei grande parte do mestrado em tempos de pandemia, e mesmo com as dificuldades, você achou tempo e disposição para me auxiliar. Uma sábia amiga brincou que faz parte dos deveres familiares...

À minha mãe, ao meu pai e à minha irmã por continuarem me apoiando durante o período da pós-graduação. Mesmo de longe se fizeram perto, me ouvindo e me auxiliando no que eu necessitava.

À Professora Gracieli pela orientação, discussões e conversas. O tema do trabalho foi um desafio, mas sob seu direcionamento e contribuição, nosso objetivo foi mais atingível. Tenho você como referência.

Aos professores da banca da qualificação e da defesa final, Helena Nierwinski, Nilo Consoli e Rafael Holdorf, pelo tempo dedicado à revisão do estudo e pelas contribuições. Ao também professor Naloan Sampa pelas discussões a respeito da modelagem numérica.

Às minhas amigas: Talita, pela companhia remota aos finais de semana, pela discussão dos resultados e pela transmissão de paz no coração. Letícia, pelas conversas, pela transmissão de conhecimento e parceria no artigo. Ângela e Marianna, pelo incentivo em entrar no mestrado e pelo auxílio no processo de ingresso. Aos demais colegas do Laboratório de Mecânica dos Solos pelo apoio, especialmente nessa reta final.

À Universidade Federal de Santa Catarina por prover um ensino de excelência.

*"Deixamos de perceber os efeitos da aleatoriedade na vida porque, quando avaliamos o mundo, tendemos a ver exatamente o que esperamos ver."
(MLODINOW, 2018)*

RESUMO

É amplamente reconhecido que as propriedades geotécnicas variam espacialmente devido à composição mineralógica, ao histórico de tensões e aos processos de deposição, mesmo dentro de camadas de solo que parecem ser homogêneas. Recentemente, há estudos para capturar a variabilidade espacial das variáveis de entrada, e campos aleatórios podem ser usados. Inclusive, podem ser implementados juntamente com Método dos Elementos Finitos (MEF) para aplicação de estabilidade de taludes. No presente estudo, buscou-se realizar uma análise probabilística utilizando campos aleatórios aplicada à estabilidade de aterros sobre solos moles. De modo a verificar a implementação de campos aleatórios em casos de estabilidade de taludes, dois trabalhos da literatura foram utilizados. Buscou-se verificar a metodologia para aplicação no estudo de caso, obtendo-se resultados considerados satisfatórios. Para o estudo de caso, foi feita a caracterização estatística dos parâmetros do solo da região em estudo - estaca de um trecho da duplicação da BR-470 em Santa Catarina. Esses dados estatísticos foram utilizados para geração de 5.000 campos aleatórios de resistência não drenada (S_u) por meio da metodologia de LAS (do inglês, *Local Average Subdivision*). Em seguida, esses campos foram introduzidos em um *software* de elementos finitos para cálculo de fator de redução dos parâmetros de resistência SRF (do inglês, *Strength Reduction Factor*) considerado equivalente ao fator de segurança. A cada simulação foi armazenado o SRF para obtenção da convergência do valor médio, aplicando-se assim o Método Monte Carlo (MMC). Para valores de SRF inferiores a 1,0, foi considerada a falha do aterro, assim foi possível também quantificar a probabilidade de falha. Como resultado para o estudo de caso, obteve-se um SRF igual a 2,275 e probabilidade de falha igual a 0,54%. Dessa forma, foi realizada a aplicação de campos aleatórios para quantificação da probabilidade de falha de aterro sobre solos moles.

Palavras-chave: Campos aleatórios. Estabilidade de taludes. Análise probabilística. Modelo numérico.

ABSTRACT

It is widely recognized that geotechnical properties vary spatially due to mineralogical composition, stress history and deposition processes, even within soil layers that appear to be homogeneous. Recently, there are studies that capture the spatial variability from input variables and random fields to create models. They can be implemented together with finite element methods (FEM) to calculate slope stability. In the present study, we sought to carry out a probabilistic analysis using random fields applied to the stability of embankments on soft soils. In order to verify the implementation of random fields in cases of slope stability, two articles were used. The methodology provided satisfactory results. It was verified and applied on this case study. A statistical characterization of the soil parameters was carried out for the region of study – a road embankment of the highway widening of BR-470 in Santa Catarina. These statistical data were used to generate 5,000 undrained shear resistance (S_u) random fields using the Local Average Subdivision (LAS) methodology. Then, these fields were introduced in a finite element software to calculate the reduction factor of the resistance parameters Strength Reduction Factor (SRF) considered equivalent to the safety factor. In each simulation, the SRF was stored to obtain the convergence of the average value, thus applying the Monte Carlo method. For SRF values lower than 1.0, an embankment failure was considered, so that it was possible to quantify the failure probability. As a result, the average SRF was equal to 2.275 and the failure probability was equal to 0.54%, which is considered a low value. Random fields were applied to quantify the probability of landfill failure on soft soils.

Keywords: Random fields. Slope stability. Probabilistic analysis. Numerical model.

Lista de Figuras

Figura 1	Esquema de um piezocone.	4
Figura 2	Exemplo de resultado de ensaio CPTu.	5
Figura 3	Ábaco normalizado do comportamento do solo a partir de ensaio CPTu.	6
Figura 4	Equipamento de ensaio de palheta.	10
Figura 5	Resultado de ensaio de palheta.	11
Figura 6	Organograma de incertezas.	12
Figura 7	Mesma média e variância e diferente padrão de variação espacial.	13
Figura 8	Esquema da escala de flutuação pelo MEV.	15
Figura 9	Exemplo de gráfico da autocorrelação para cálculo da escala de flutuação.	16
Figura 10	Exemplo de geração de um campo com TBM.	22
Figura 11	Exemplo de campo aleatório TBM gerado com apenas 16 linhas.	23
Figura 12	Conceito da metodologia LAS para campo de uma dimensão.	25
Figura 13	Metodologia LAS para duas dimensões.	27
Figura 14	Metodologia desenvolvida.	34
Figura 15	Interface gráfica do programa RFEM.	36
Figura 16	Implementação do campo aleatório em estabilidade de talude.	38
Figura 17	Dimensões da seção utilizada pelos autores, medidas em metros.	41
Figura 18	Convergência da probabilidade de falha do talude da literatura.	43
Figura 19	Convergência da probabilidade de falha do talude da literatura para comparação.	44
Figura 20	Verificação da convergência de probabilidade de falha nos dois programas.	45
Figura 21	Superfície de ruptura de talude modelada no Abaqus.	46
Figura 22	Superfície de ruptura de talude modelada no RFEM.	47
Figura 23	Média da resistência não drenada em cada seção transversal em função do comprimento do talude.	48
Figura 24	Geometria do modelo numérico e condição de contorno.	49
Figura 25	Histograma de ocorrência de FS para modelo 2D.	50
Figura 26	Histograma de ocorrência de FS para modelo 3D.	51
Figura 27	Estabilização do fator de segurança com o número de simulações.	52
Figura 28	Histograma de resultado de FS para 5.000 simulações.	53
Figura 29	Histograma de resultado de FS selecionando 166 simulações.	54
Figura 30	Superfície de ruptura de talude modelada no Abaqus.	55
Figura 31	Superfície de ruptura de talude modelada no RFEM.	55
Figura 32	Localização da área de estudo.	57
Figura 33	Perfil característico.	58

Figura 34	Localização dos pontos de sondagem CPTu da área de estudo.	59
Figura 35	Perfil longitudinal de três ilhas de investigação analisadas por Cordeiro (2019).	61
Figura 36	Perfil de investigação de CPTu km 30+220: a) resistência real mobilizada (q_t); b) u_2 e u_0 ; c) B_q ; d) razão de atrito (R_f); e) comportamento do material pelo índice I_{crw}	63
Figura 37	Análise do perfil de resistência do km 30+220: a) resistência não drenada; b) resistência não-drenada normalizada pela tensão efetiva vertical; c) OCR estimado com K1 de Kulhawy e Mayne (1990) e d) K2 de Chen e Mayne (1996).	66
Figura 38	Ajuste da distribuição teórica aos dados empíricos de q_c e Gráfico Q-Q.	68
Figura 39	Ajuste da distribuição teórica aos dados empíricos de q_t e Gráfico Q-Q.	68
Figura 40	Ajuste da distribuição teórica aos dados empíricos de f_s e Gráfico Q-Q.	69
Figura 41	Ajuste da distribuição teórica aos dados empíricos de S_u e Gráfico Q-Q.	69
Figura 42	Escala de flutuação pelo Método Expedito de Vanmarcke: a) Resistência de ponta; b) Resistência de ponta corrigida; c) Atrito lateral; d) Resistência não drenada.	72
Figura 43	Autocorrelação dos dados de q_c pela distância de separação vertical.	73
Figura 44	Autocorrelação dos dados de q_t pela distância de separação vertical.	74
Figura 45	Autocorrelação dos dados de f_s pela distância de separação vertical.	74
Figura 46	Autocorrelação dos dados de S_u pela distância de separação vertical.	75
Figura 47	Malhas utilizadas para geração de campo aleatório: a) com dimensão de 0,05m x 0,05m b) com dimensão de 1,0m x 1,0m.	77
Figura 48	Exemplo de um campo aleatório gerado pelo método LAS.	78
Figura 49	Dimensões em metros do modelo e condições de contorno.	79
Figura 50	Malha utilizada para o modelo numérico do estudo de caso.	80
Figura 51	Cunha de ruptura para estudo de caso, com FS=2,275.	81
Figura 52	Deformação plástica equivalente para estudo de caso, com FS=2,275.	81
Figura 53	Caso de ruptura para estudo de caso, com FS<1,0, com plotagem da deformação.	82
Figura 54	Caso de ruptura para estudo de caso, com FS<1,0, com plotagem da deformação plástica equivalente.	82
Figura 55	Estabilização do fator de segurança com o número de simulações - estudo de caso.	83
Figura 56	Histograma dos FS resultantes do estudo de caso, sem apresentar rupturas.	83
Figura 57	Histograma dos FS resultantes do estudo de caso com todos.	84
Figura 58	Autocorrelação dos dados de q_c residual pela distância de separação vertical.	116
Figura 59	Autocorrelação dos dados de q_t residual pela distância de separação vertical.	116
Figura 60	Autocorrelação dos dados de f_s residual pela distância de separação vertical.	117

Figura 61 Autocorrelação dos dados de S_u residual pela distância de separação vertical. 117

Lista de Tabelas

Tabela 2	Classificação do solo a depender da zona no ábaco.	6
Tabela 3	Classificação do solo segundo o I_{cRW}	7
Tabela 4	Modelos de autocorrelação usuais e suas frequências de utilização	18
Tabela 5	Valores de referência para escala de flutuação.	18
Tabela 6	Valores de escala de flutuação para propriedades geotécnicas.	19
Tabela 7	Informações de trabalhos que analisaram estabilidade de taludes.	31
Tabela 8	Referência de FDP para propriedades do solo	32
Tabela 9	Nível de aceitação de probabilidade de falha	32
Tabela 10	Valores atribuídos a parâmetros para seção da literatura.	42
Tabela 11	Parâmetros estatísticos de campo aleatórios lognormais.	42
Tabela 12	Valores atribuídos a parâmetros da versão adaptada.	44
Tabela 13	Parâmetros estatísticos atribuídos à resistência não drenada.	45
Tabela 14	Comparação de resultados de probabilidades de falha.	47
Tabela 15	Valores atribuídos aos parâmetros da seção.	49
Tabela 16	Valores estatísticos atribuídos à resistência não drenada.	50
Tabela 17	Tempos totais de processamento da modelagem numérica para modelos da literatura.	56
Tabela 18	Valores de Nkt utilizados por Cordeiro (2019).	64
Tabela 19	Estatística do teste de K-S e conclusão sobre aderência da distribuição de probabilidades lognormal.	70
Tabela 20	Escalas de flutuação obtidas por três métodos para os parâmetros do solo.	75
Tabela 21	Resumo dos dados de entrada para criação do campo aleatório do estudo de caso.	78
Tabela 22	Valores atribuídos aos parâmetros utilizados na modelagem numérica.	79
Tabela 23	Tempos totais de processamento da modelagem numérica.	87
Tabela 24	Parâmetros estatísticos da resistência de ponta (q_c).	92
Tabela 25	Parâmetros estatísticos da resistência real mobilizada no ensaio (q_t).	93
Tabela 26	Parâmetros estatísticos do atrito lateral (f_s).	94
Tabela 27	Parâmetros estatísticos da variação de proressão (Δu).	94

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMA	Adequação do Modelo de Autocorrelação
ASTM	American Society for Testing and Materials
CMD	<i>Covariance Matrix Decomposition</i>
CPTu	<i>Piezocone Penetration Test</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform Method</i>
FDP	Função Densidade de Probabilidade
FFT	<i>Fast Fourier Transform Method</i>
FS	Fator de Segurança
FV	<i>Field Variable</i>
IAA	Integração da função de Autocorrelação da Amostra
KS	Kolmogorov-Smirnov
LAS	<i>Local Average Subdivision</i>
MA	<i>Moving-Average Method</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEV	Método Expedito de Vanmarcke
MLE	<i>maximum-likelihood estimation</i>
MMC	Método Monte Carlo
NA	Normalmente adensado
NBR	Norma Brasileira
OCR	<i>Overconsolidation Ratio</i>
PEEQ	<i>Equivalent plastic strain</i>
RFEM	<i>Random Finite Element Method</i>
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
SRF	<i>Strength Reduction Factor</i>
SRFEM	<i>Strength Reduction Finite Element Method</i>
TBM	<i>Turning Bands Method</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USDFLD	<i>User subroutine to redefine fiels variables at a material point</i>
UU	<i>Unconsolidated and Undrained</i>

Lista de Símbolos

B_q	Parâmetro de poropressão
C	Função covariância
c	Coessão
$C(\tau_j)$	Covariância
COV	Função covariância
\bar{d}	Distância média de cruzamento
E	Módulo de elasticidade
$E[x]$	Função valor esperado
F_r	Taxa de atrito normalizada
f_s	Atrito lateral
H_0	Hipótese inicial
I_{cRW}	Índice de classificação do material
kPa	Quilopascal
Mpa	Megapascal
N_{kt}	Fator de capacidade do cone
N_{SPT}	Resistência à penetração do amostrador SPT
$PEEQ$	Deformação plástica equivalente
P_f	Probabilidade de falha
q_c	Resistência de ponta
q_t	Resistência real mobilizada
Q_{tn}	Resistência normalizada
r	Coefficiente de correlação
R_f	Razão de atrito
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenada
u	Poropressão
U	Deformação
\vec{u}	Vetor radial
u_0	Pressão hidrostática
u_2	Poropressão medida na base do cone
$Z(x)$	Campo aleatório
α	Nível de significância
β_i	Ângulo formado entre linha e eixo
γ	Peso específico

Δz	Distância mínima entre dois pontos consecutivos
θ	Escala de flutuação
μ	Média
ξ	Resultado da projeção de vetores
ρ	Função de autocorrelação
σ	Desvio padrão
σ^2	Variância
σ_{atm}	Pressão atmosférica
σ_{v0}	Tensão vertical inicial
σ'_{v0}	Tensão vertical inicial efetiva
σ'_{vm}	Tensão de pré-adensamento
τ	Distância de separação
ν	Coeficiente de Poisson
ϕ	Ângulo de atrito
ψ	Ângulo de dilatância

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	ENSAIOS DE CAMPO	3
2.1.1	Ensaio de piezocone	3
2.1.2	Ensaio de palheta	9
2.2	INCERTEZAS NA GEOTECNIA	11
2.3	CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE	13
2.3.1	Método Expedito de Vanmarcke (MEV)	15
2.3.2	Integração da função de Autocorrelação da Amostra (IAA)	16
2.3.3	Adequação do Modelo de Autocorrelação (AMA)	17
2.3.4	Valores de referência para a escala de flutuação	18
2.4	TEORIA DOS CAMPOS ALEATÓRIOS	19
2.4.1	Métodos de modelagem da variabilidade espacial	21
2.5	USO DE CAMPO ALEATÓRIO EM ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE	28
3	IMPLEMENTAÇÃO DE CAMPOS ALEATÓRIOS EM CASOS DE ESTABILIDADE DE TALUDES	33
3.1	IMPLEMENTAÇÃO	33
3.2	VERIFICAÇÃO	41
3.2.1	Modelo de Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017)	41
3.2.2	Modelo de Liu <i>et al.</i> (2018)	47
3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
4	ESTUDO DE CASO: ATERRO SOBRE SOLOS MOLES BR-470, km 30+220	57
4.1	ÁREA DE ESTUDO	57
4.2	ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO KM 30+220	67
4.2.1	Distribuições dos parâmetros do solo	67
4.2.2	Escala de flutuação	71
4.3	CAMPO ALEATÓRIO	76
4.4	MODELAGEM NUMÉRICA	78
4.5	DISCUSSÃO	84

4.5.1	Caracterização geotécnica e de estatística dos parâmetros	84
4.5.2	Probabilidade de falha da seção BR-470, km 30+220	85
5	CONCLUSÕES	86
	Referências	88
A	Dados estatísticos sobre os pontos de investigação de CPTu	92
B	<i>Script</i> para adequação do campo aleatório criado no RFEM para o Abaqus	96
C	<i>Script</i> para cálculo do FS para o campo aleatório	100
D	Sub-rotina para indicação das coordenadas do campo aleatório	101
E	Esquema de alteração das <i>keywords</i> no Abaqus	102
F	<i>Script</i> de simulação do modelo do estudo de caso no Abaqus	103
G	<i>Script</i> para obtenção dos valores dos <i>outputs</i> desejados com processamento dentro do Abaqus	113
H	<i>Script</i> para obtenção da informação de falha	115
I	Gráficos de autocorrelação para valores residuais	116

1 INTRODUÇÃO

É amplamente reconhecido que as propriedades geotécnicas variam espacialmente devido à composição mineralógica, ao histórico de tensões e aos processos de deposição, mesmo dentro de camadas de solo que parecem ser homogêneas (JIANG; PAPAIOANNOU; STRAUB, 2018). Essa alta variabilidade faz com que engenheiros geotécnicos enfrentem grandes desafios, principalmente por causa de restrições econômicas. Em um cenário perfeito, seriam feitas diversas sondagens, efetuada retirada de amostras e executados diversos ensaios. Na realidade, lida-se com dados de investigação de local muito limitados. A abordagem tradicional para trabalhar com essa incerteza no projeto geotécnico é realizada utilizando valores característicos das propriedades do solo juntamente com um generoso fator de segurança (FENTON; GRIFFITHS, 2008).

Nos últimos anos, a capacidade de medir as propriedades de solos naturais se expandiu rapidamente. Argumenta-se, no entanto, que as habilidades correspondentes para entender o que muitas dessas medições significam para as previsões de engenharia, ou para lidar com a variabilidade entre as medições, não acompanharam essa evolução (BAECHER; CHRISTIAN, 2003).

Recentemente, surgiram estudos para capturar a variabilidade espacial das variáveis de entrada em que campos aleatórios podem ser usados (JIANG; PAPAIOANNOU; STRAUB, 2018; ALAMANIS; DAKOULAS, 2019; CAMPELLO, 2020; HOUMADI *et al.*, 2020; MAHMOUDI *et al.*, 2020; OU-YANG *et al.*, 2021). Há diversas metodologias para geração desses campos, que utilizam características estatísticas como variáveis de entrada. Com o uso desses campos, a incerteza das propriedades que variam no espaço pode ser levada em consideração em um programa que utiliza método de elementos finitos. Por fim, quando essa variação no espaço é levada em consideração, o modelo estudado pode mostrar um comportamento do material e mecanismos de falha mais realistas (HAVE, 2015).

A análise de estabilidade de taludes é um ramo significativo da engenharia geotécnica. Geralmente, as incertezas são inevitáveis em problemas de taludes, entre as quais a variabilidade espacial inerente às propriedades geotécnicas é considerada uma das principais fontes de incerteza. Na análise de estabilidade de taludes, podem ser gerados campos aleatórios que são empregados para descrever a variabilidade espacial inerente às propriedades do solo, com o cálculo da estabilidade realizado em *software* de elementos finitos (LIU *et al.*, 2019).

Diversas pesquisas apresentam como processo de consideração da variabilidade de solo o uso de campos aleatórios em análises em MEF para análises de estabilidade de taludes: Griffiths, Huang e Fenton (2009), Jha e Ching (2013), Li *et al.* (2015), Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017), Liu *et al.* (2018), entre outros.

No contexto das disciplinas de engenharia, o adjetivo “não determinístico” refere-se a uma ampla gama de métodos e técnicas que dependem mais frequentemente – mas não exclusivamente – da

teoria estatística e da probabilidade (UZIELLI, 2022). As aplicações não determinísticas motivam a estrutura do presente trabalho, no qual a teoria de campos aleatórios é utilizada para representar a variabilidade inerente do solo mole de fundação de aterros. Os campos aleatórios foram gerados pelo método LAS (do inglês, *Local Average Subdivision*), no qual sua estabilidade foi verificada em um programa de elementos finitos, em um conjunto de simulações de Monte Carlo para o cálculo da probabilidade de falha.

1.1 OBJETIVO GERAL

Aplicação de campos aleatórios para quantificação da probabilidade de falha de aterro sobre solos moles.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Implementação e verificação de campos aleatórios para cálculo da probabilidade de falha e do fator de segurança de aterro sobre solo mole.
- Caracterização estatística para identificação dos parâmetros geotécnicos necessários para modelagem de campos aleatórios em elementos finitos.
- Cálculo da probabilidade de falha para um modelo geomecânico de um aterro sobre solos moles - estudo de caso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é realizada uma revisão da literatura para temas que são abordados no decorrer da pesquisa. Inicialmente é apresentada uma breve revisão de ensaios de campo com diferentes metodologias de classificação de comportamento de camadas de solo, em seguida são abordados assuntos relacionados à incerteza inerente à análise de dados geotécnicos e seus dados estatísticos e como estes interferem na geração de campos aleatórios. Em seguida, são apresentadas as principais metodologias de geração de campos aleatórios com aplicações em geotecnia, em especial para análise de estabilidade de taludes.

2.1 ENSAIOS DE CAMPO

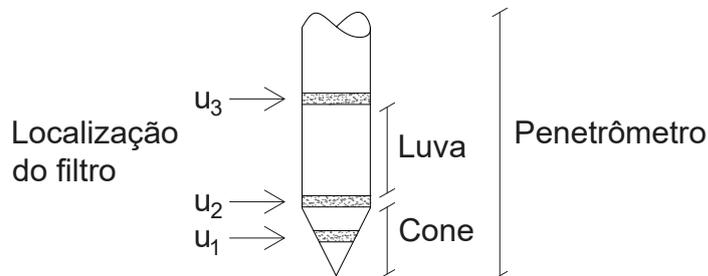
No decorrer do texto, são discutidos dados e análises de dois ensaios de campo, o ensaio de piezocone e o ensaio de palheta. Dessa forma, são apresentadas na revisão bibliográfica as informações mais relevantes para a compreensão do trabalho desenvolvido.

2.1.1 Ensaio de piezocone

Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), o ensaio de piezocone (CPTu, do inglês, *Piezocone Penetration Test*) se caracteriza como uma das ferramentas de prospecção geotécnica mais importantes internacionalmente. A partir desse ensaio, pode-se obter a estratigrafia de perfis do solo, determinar as propriedades de materiais e prever a capacidade de carga de fundações.

O ensaio consiste em cravar o piezocone no solo com uma velocidade padrão de 20mm/s e medir a resistência de ponta (q_c) a essa cravação, além de medir e armazenar a resistência de atrito lateral (f_s) e as poropressões (u) pela extensão da profundidade do ensaio, sendo o intervalo de leitura desses parâmetros programável (geralmente são realizadas leituras a cada segundo - o que resulta em leituras a cada 2cm). Uma visão geral da ponteira cônica com destaque para as três posições de medições da poropressão pode ser observada na Figura 1 (LUNNE; ROBERTSON; POWELL, 1997).

Figura 1: Esquema de um piezocone.

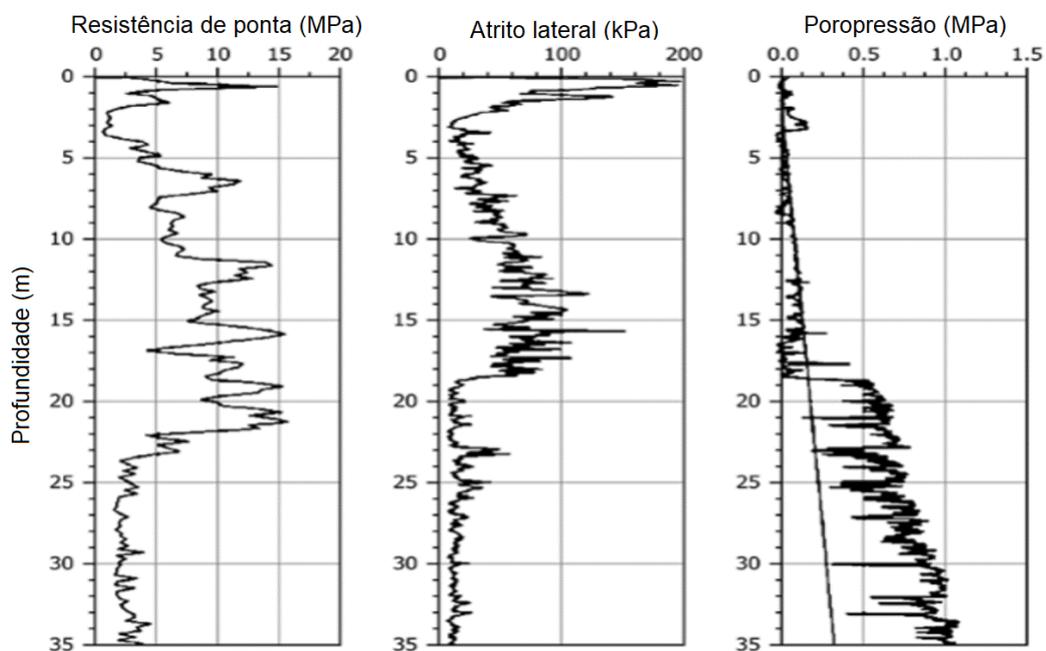


Fonte: Lunne, Robertson e Powell (1997).

No Brasil, o método para determinação da resistência do solo por meio do ensaio piezocone é prescrito pela Norma Brasileira (NBR) 12069 (ABNT, 1991), que foi cancelada em 2015. Uma norma mais atual e internacional para ensaios com piezocone é a ASTM (2020)¹, que indica como padrão para pontas cônicas uma área transversal de 10cm² e 15cm² e com ângulo interno de 60°. Os intervalos de tolerância para essas características também são apresentados pela normativa. Além disso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1991) ainda exibe um exemplo de resultado de um ensaio convencional, conforme a Figura 2, em que podem ser observados três gráficos, em que todos identificam a variação do parâmetro com a profundidade. O primeiro refere-se à resistência de ponta, o segundo, ao atrito lateral e o último apresenta resultados de poropressão, além de identificar a pressão hidrostática (reta).

¹Do inglês, *American Society for Testing and Materials*

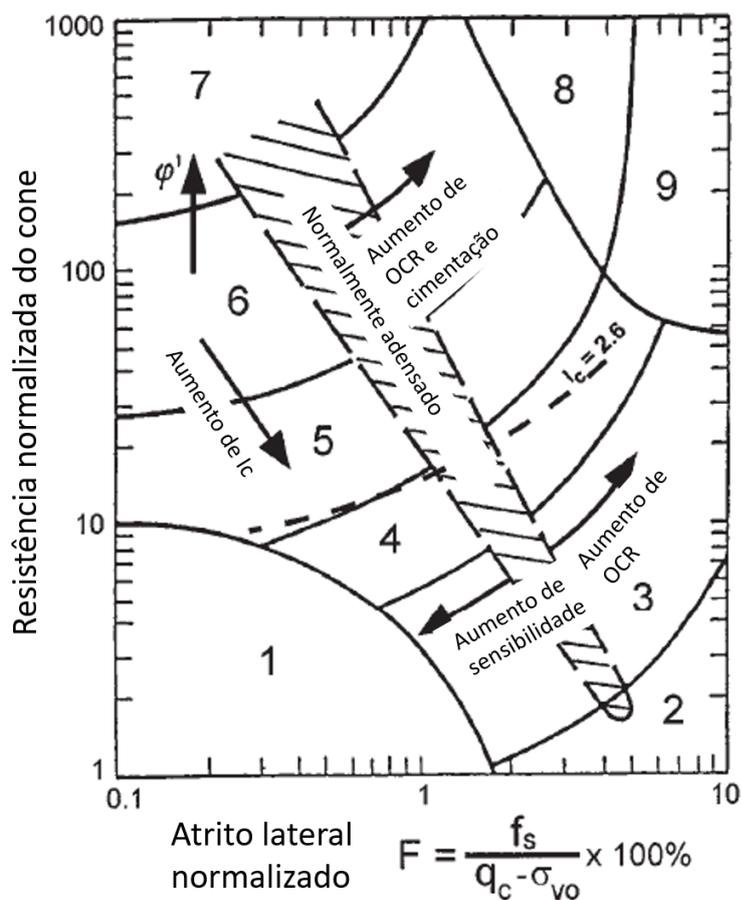
Figura 2: Exemplo de resultado de ensaio CPTu.



Adaptado de: ASTM (2020).

A partir dos parâmetros obtidos no ensaio, é possível classificar o comportamento do material, sem que seja necessário obter sua característica granulométrica. Para isso, há diversas metodologias baseadas em ábacos como o da Figura 3. O ábaco relaciona a resistência normalizada do ensaio de cone e a taxa de atrito normalizada. A partir desses parâmetros, é possível identificar o material a depender da zona. São identificadas nove zonas que se traduzem em nove tipos de solos (Tabela 2).

Figura 3: Ábaco normalizado do comportamento do solo a partir de ensaio CPTu.



Adaptado de: Robertson e Wride (1998).

Tabela 2: Classificação do solo a depender da zona no ábaco.

ZONA	TIPOS DE SOLOS
1	solo fino sensível
2	solo orgânico e turfas
3	argilas - argilas siltosas
4	argila siltosa - silte argiloso
5	siltos arenosos - areias siltosas
6	areias limpas - areias siltosas
7	areias com pedregulhos - areias
8	areias - areias limpas
9	areias finas rígidas

Fonte: Robertson (1990).

Para equacionar o ábaco ilustrado, compreendendo incertezas associadas, uma já consagrada metodologia da literatura foi proposta por Robertson e Wride (1998). Nessa proposição, um índice de classificação do material (I_{cRW}) deve ser calculado a partir da Equação 1.

$$I_{cRW} = \sqrt{[3,47 - \log_{10}(Q_{tn})]^2 + [1,22 + \log_{10}(F_r)]} \quad (1)$$

Onde:

F_r representa a razão normalizada do atrito, apresentada pela Equação 2 (ROBERTSON, 1990).

Q_{tn} representa a resistência normalizada do ensaio de cone, apresentada pela Equação 3 (ROBERTSON, 2004).

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} * 100\% \quad (2)$$

$$Q_{tn} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{atm}} \left(\frac{\sigma_{atm}}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (3)$$

Onde:

q_t é a resistência real mobilizada no ensaio.

σ_{v0} é a tensão vertical inicial.

σ'_{v0} é a tensão vertical inicial efetiva.

σ_{atm} é a pressão atmosférica (1 atmosfera = 100kPa).

n é igual a 1 para argilas, 0,75 para solos siltosos e 0,5 para areias.

Realizado o cálculo do índice de classificação do material, deve-se definir o tipo de solo com base na Tabela 3.

Tabela 3: Classificação do solo segundo o I_{cRW} .

Classificação do solo	Índice I_{cRW}
Argilas orgânicas	$I_{cRW} > 3,60$
Argilas	$2,95 < I_{cRW} < 3,60$
Misturas de siltes	$2,60 < I_{cRW} < 2,95$
Misturas de areias	$2,05 < I_{cRW} < 2,60$
Areias	$1,31 < I_{cRW} < 2,05$
Areias com pedregulhos	$I_{cRW} < 1,31$

Adaptada de: Robertson e Wride (1998).

Com base nos parâmetros obtidos diretamente por meio do ensaio, é possível estimar outros mediante correlações. Na literatura, há correlações usuais para argilas que podem obter, por exemplo, uma estimativa da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), que é determinada de forma indireta pela Equação 4 (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (4)$$

Onde:

S_u é a resistência ao cisalhamento não drenada.

q_t é a resistência real mobilizada.

σ_{v0} é a tensão vertical inicial.

N_{kt} é o fator de capacidade do cone, com base em q_t .

O fator de capacidade do cone pode ser obtido relacionando a medida de resistência real mobilizada com a resistência não drenada medida por ensaios de palheta, possibilitando a determinação direta dos fatores de cone, como observado na Equação 5 (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Esses autores apresentam em seu livro uma tabela com variações desse parâmetro, citando pesquisas nacionais e internacionais, cujos intervalos de valores variam de 8 a 18. Destacam ainda que, para argilas normalmente adensadas a ligeiramente pré-adensadas, de alta plasticidade, os valores de N_{kt} , podem ocorrer na faixa entre 10 e 20.

$$N_{kt} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{S_u} \quad (5)$$

Onde:

N_{kt} é o fator de capacidade do cone.

q_t é a resistência real mobilizada.

σ_{v0} é a tensão vertical inicial.

S_u é a resistência ao cisalhamento não drenada.

A melhor compreensão do comportamento de depósitos de argilas moles envolve o conhecimento da magnitude da tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Uma correlação que pode ser feita a partir de ensaios de piezocone para obter essa propriedade envolve a resistência de ponta (Equação 6) ou o excesso de poropressão gerado (Equação 7). Essas correlações

foram pesquisadas por Kulhawy e Mayne (1990) e Chen e Mayne (1996), respectivamente.

$$\sigma'_{vm} = K_1(q_t - \sigma_{v0}) \quad (6)$$

$$\sigma'_{vm} = K_2(q_t - u_2) \quad (7)$$

Onde:

σ'_{vm} é a tensão de pré-adensamento.

q_t é a resistência real mobilizada.

σ_{v0} é a tensão vertical efetiva inicial.

u_2 é a poropressão medida na base do cone.

K_1 e K_2 são os coeficientes propostos pelos autores.

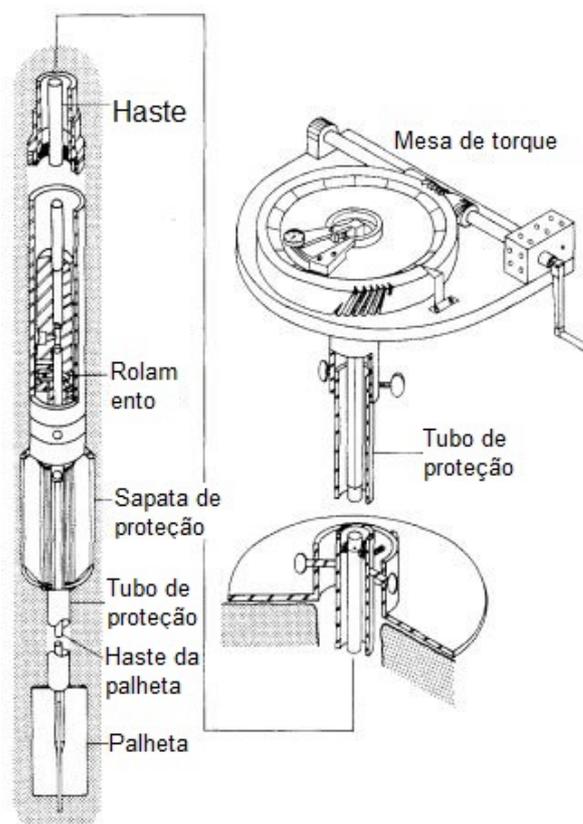
Ainda considerando o comportamento de argilas, os resultados do ensaio podem ser utilizados para a definição de módulos elásticos não drenados, OCR (do inglês, *Overconsolidation Ratio*), entre outros. Para as areias, as correlações costumam abranger equações para estimativa de ângulo de atrito, módulos elásticos e módulo de cisalhamento. Uma visão geral da interpretação do ensaio pode ser encontrada em Schnaid e Odebrecht (2012).

2.1.2 Ensaio de palheta

O ensaio de palheta é tradicionalmente usado na determinação de resistência ao cisalhamento não drenado (S_u) de depósitos de argilas moles. Dessa forma, para realizar o ensaio, é necessário um conhecimento prévio da natureza do solo a ser investigado não somente para realizá-lo, como para posteriormente interpretar seus resultados (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Atualmente, a normativa brasileira que prescreve o método para a determinação da resistência não drenada é a ABNT NBR 10905/1989 (ABNT, 1989). A Figura 4 indica um esquema do equipamento de ensaio de palheta. Segundo os autores, há três recomendações de natureza prática para definir a usabilidade do ensaio:

1. N_{SPT} menor ou igual a 2, ou seja, resistência a penetração menor ou igual a 1.000 kPa.
2. Matriz predominantemente argilosa.
3. Ausência de lentes de areia.

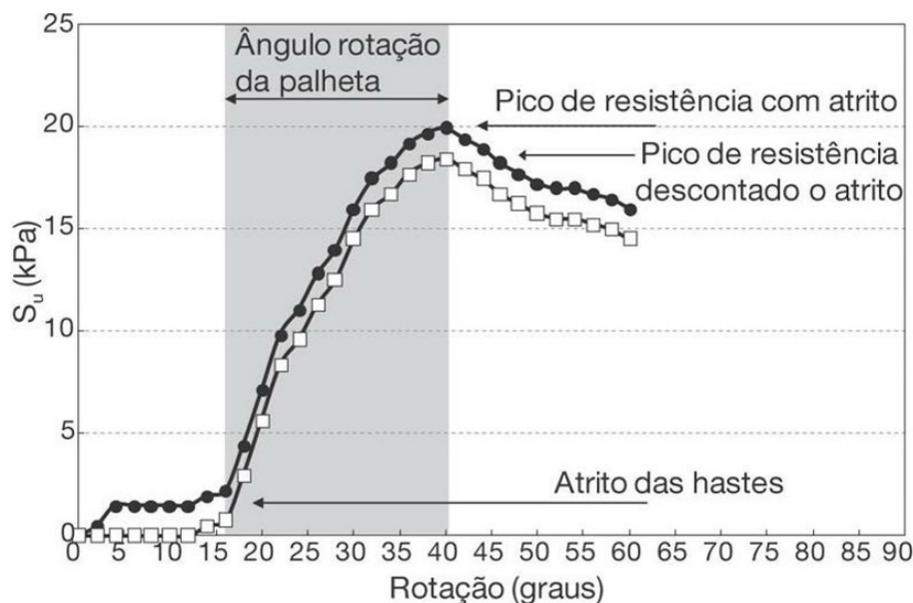
Figura 4: Equipamento de ensaio de palheta.



Adaptado de: Ortigão e Collet (1988).

Consideradas as recomendações, a Figura 5 identifica um modelo de resultados de ensaio, cuja curva é representativa de solo argiloso, segundo Schnaid e Odebrecht (2012). No gráfico, o eixo das abcissas apresenta a rotação da palheta, e o eixo das ordenadas, a resistência ao cisalhamento não drenada. Há duas curvas apresentadas, a curva com ícones circulares representa os dados originais, e a com ícones quadráticos, representa os valores corrigidos. Nesse segundo caso, o valor do torque é corrigido pelo atrito inicial nas hastes, em que este é descontado para a criação da segunda curva (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Figura 5: Resultado de ensaio de palheta.



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

2.2 INCERTEZAS NA GEOTECNIA

El-Ramly (2001) identifica que, na engenharia geotécnica, a incerteza é inerente em todas as fases de projeto, desde a caracterização do local em suas análises e projeto até a tomada de decisão e construção. A influência da incerteza na confiabilidade na avaliação da segurança é significativa e sua consequência é refletida em falhas de estruturas. O autor também pontua que, na área da pesquisa, a incerteza na geotecnia foi estudada há tempos, mas a indústria ainda não a aplicou com ferramentas práticas (EL-RAMLY, 2001).

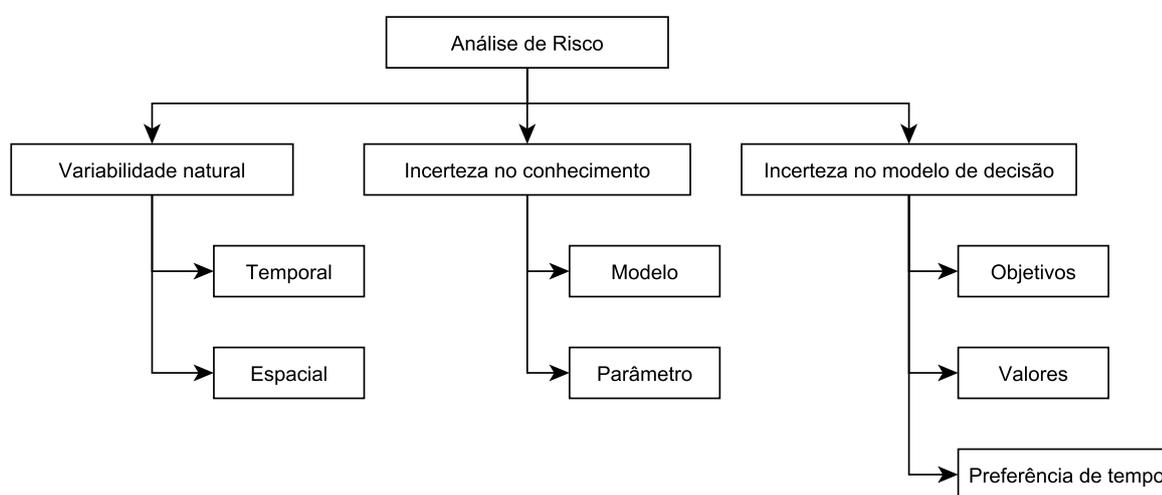
Phoon e Kulhawy (1999) apontam que há três fontes primárias da incerteza geotécnica: variabilidade inerente, erros de medição e incerteza na transformação. A primeira resulta no processo natural geológico que modifica o solo *in situ*. A segunda seria causada pelo equipamento, pelo operador do equipamento e pelos efeitos aleatórios de testagem. Os autores afirmam que essas duas primeiras fontes descrevem a dispersão dos dados. A terceira fonte seria a incerteza introduzida quando as medições de campo ou de laboratório são transformadas em projeto utilizando-se modelos empíricos ou correlações.

Complementando a proposta de Phoon e Kulhawy (1999), o trabalho de Baecher e Christian (2003) identifica três categorias de incertezas em risco e confiabilidade geotécnica (Figura 6). A primeira refere-se à variabilidade natural do material, que seria a aleatoriedade inerente do processo natural: um fenômeno que varia com o tempo e com o espaço. A segunda categoria, elencada como incerteza no conhecimento, divide-se em três subcategorias: i) a incerteza na escolha do modelo matemático adequado à realidade e a incerteza do parâmetro, que envolve a precisão do

parâmetro estimado. Esta resulta da imprecisão na avaliação dos valores dos parâmetros dos dados de ensaio ou calibração e, é restringida por um número limitado de observações; ii) a incerteza na caracterização do local, resultante de erros de ensaio e da representatividade inadequada das amostras, por exemplo; e iii) a incerteza no parâmetro está relacionada com a precisão com que os parâmetros do modelo podem ser estimados. Resulta da imprecisão na avaliação dos valores a partir de dados de ensaios ou calibração e é acentuada pelo número limitado de observações.

A terceira categoria refere-se à incerteza no modelo de decisão, que são incertezas operacionais, incluindo as associadas à construção, à fabricação, à deterioração, à manutenção e a fatores humanos.

Figura 6: Organograma de incertezas.



Adaptado de: Baecher e Christian (2003).

El-Ramly (2001) apresenta outra categorização de incertezas, mas que está contida na proposta de Baecher e Christian (2003): incerteza no parâmetro, incerteza no modelo e incerteza humana. No que diz respeito à incerteza nos parâmetros, El-Ramly (2001) explica que envolve os parâmetros usados como dados de entrada em análises de resistência, compressibilidade e poropressão. No caso da incerteza no modelo, esclarece que está relacionada com a lacuna entre a teoria adotada na previsão de modelos e a realidade. Para essa categoria, afirma que provavelmente é a maior fonte de incertezas na engenharia geotécnica. E por fim, para a incerteza humana, define que a é resultado de erros humanos, sendo que são aleatórios e imprevisíveis.

Ao se pesquisar sobre incerteza, frequentemente depara-se com o assunto de risco. Whitmann (2000) em seu artigo alerta para o melhor uso dos termos e seus significados e pontua conceitos gerais para cada termo. Para o autor, a avaliação de risco apresenta como um dos seus processos a quantificação de risco, em que risco expressa a chance de uma perda ocorrer e comumente assume a forma do produto da probabilidade de que um perigo ocorra e a probabilidade de uma perda dado que

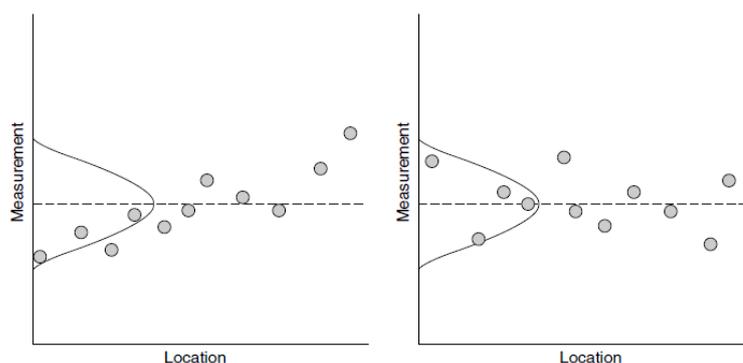
um perigo ocorreu. No entanto, aponta que a quantificação do risco sucede da teoria e cálculos ou de julgamentos subjetivos, e ambas abordagens podem ser aplicadas na avaliação de risco. Por outro lado, afirma que a avaliação de risco teria um significado mais amplo, o qual inclui a identificação de riscos e consequências e a investigação de minimização de riscos e suas consequências e a priorização de ações remediadoras. Por fim, ainda expõe que a abordagem probabilística implica no uso de outros conceitos, como a teoria da probabilidade formal, a teoria de confiabilidade, estatística, entre outros, e no uso dessas ferramentas teóricas.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE

Segundo Baecher e Christian (2003), parâmetros estatísticos como médias e desvios-padrão são usados para descrever a variabilidade em um conjunto de dados de propriedades do solo. No entanto, não são suficientes para a compreensão de informações espaciais, e complementam que descrever a variação das propriedades do solo no espaço requer informações, como os parâmetros descritos na sequência.

Uma dos parâmetros que os autores apresentam é a descrição da tendência dos dados. A tendência pode ser observada exemplificadamente na Figura 7. Nos dois gráficos ilustrados, a média e o desvio-padrão são os mesmos para o conjunto de dados representados pelos círculos. Embora o ajuste indique a mesma distribuição normal, esta não capta a tendência diagonal dos dados.

Figura 7: Mesma média e variância e diferente padrão de variação espacial.



Fonte: Baecher e Christian (2003).

Um modelo para variabilidade espacial de dados que pode ser usado é separado em duas partes: uma tendência determinística conhecida e variabilidade residual sobre essa tendência, como demonstra a Equação 8 (BAECHER; CHRISTIAN, 2003).

$$s(x) = t(x) + w(x) \quad (8)$$

Onde:

$s(x)$ é a propriedade do solo em uma determinada localização.

$t(x)$ é o valor da tendência.

$w(x)$ é a variação residual.

Os autores complementam ainda que a tendência é determinada por uma equação - que pode ser linear -, e o resíduo, por sua vez, é caracterizado usualmente por média igual a zero.

Um terceiro parâmetro que caracteriza a variabilidade é a covariância. Devore (2006) define a covariância entre duas variáveis como mostra a Equação 9. Dessa forma, quando duas variáveis aleatórias X e Y não são independentes, deseja-se verificar o grau de relação entre elas. Caso essas variáveis sejam independentes, sua covariância é próxima a zero.

$$COV(X, Y) = E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)] \quad (9)$$

Onde:

COV é a função covariância.

$E[x]$ é a função valor esperado.

μ é a média da variável.

Há também o coeficiente de correlação. A Equação 10 define esse parâmetro para as variáveis X e Y .

$$r_{X,Y} = \frac{COV(X, Y)}{\sigma_X * \sigma_Y} \quad (10)$$

Onde:

$r_{X,Y}$ é o coeficiente de correlação entre X e Y

σ é o desvio padrão.

Outro parâmetro estatístico que caracteriza a variação é a escala de flutuação, visto que é uma medida de variabilidade necessária para geração de campos aleatórios. Esse parâmetro também é chamado de comprimento de correlação (do inglês, *correlation length*) e de distância de autocorrelação (do inglês, *autocorrelation distance*). De todo modo, o parâmetro descreve a distância na qual os parâmetros de um solo ou rocha são semelhantes ou correlacionados. Propriedades do solo de locais adjacentes no perfil do solo tendem a ter valores semelhantes, e conforme a distância de amostragem aumenta, a correlação diminui. A escala de flutuação é usada como dado de entrada

para um modelo de função de autocorrelação (por exemplo, Markoviano ou Gaussiano), que é prescrito ou identificado a partir de valores de autocorrelação empíricos em defasagens discretas por meio de alguns procedimentos de ajuste (CAMI *et al.*, 2020). Em seguida são apresentados três métodos de estimação da escala de flutuação: Método Expedito de Vanmarcke (MEV), Integração da função de Autocorrelação da Amostra (IAA) e Adequação do Modelo de Autocorrelação (AMA).

2.3.1 Método Expedito de Vanmarcke (MEV)

Segundo Kenarsari, Chenari e Eslami (2013), o MEV determina a escala de flutuação por meio do cálculo da distância média entre pontos consecutivos que cruzam uma linha de tendência de um perfil, de acordo com o ilustrado na Figura 8. A distância média pode ser obtida pela Equação 11, que alimenta a Equação 12 proposta pelos autores.

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (11)$$

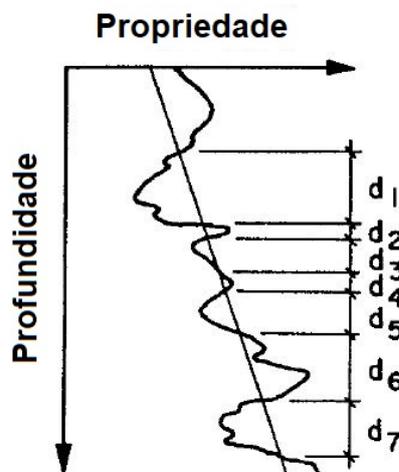
$$\theta = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \bar{d} = 0,8 \bar{d} \quad (12)$$

Onde:

\bar{d} é a distância média de cruzamento.

θ é a escala de flutuação.

Figura 8: Esquema da escala de flutuação pelo MEV.

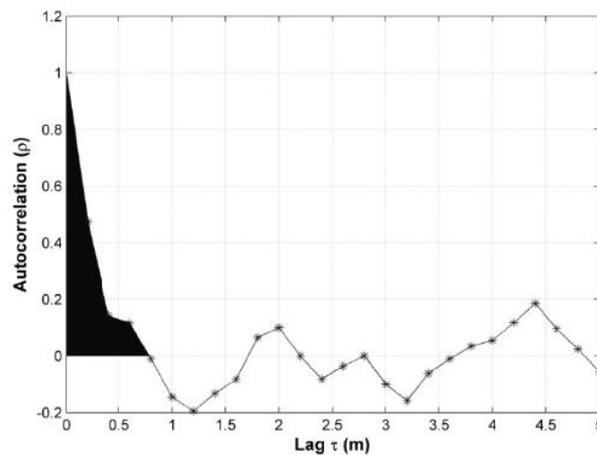


Adaptado de: Phoon e Kulhawy (1999).

2.3.2 Integração da função de Autocorrelação da Amostra (IAA)

O segundo método de obtenção de escala de flutuação levantado foi o da IAA. Neste método a escala de flutuação é obtida numericamente através do cálculo da área positiva abaixo da curva de autocorrelação, como mostra a Figura 9 e está demonstra a Equação 13 (SALGADO; PREZZI; GANJU, 2015).

Figura 9: Exemplo de gráfico da autocorrelação para cálculo da escala de flutuação.



Fonte: Kenarsari, Chenari e Eslami (2013).

A Figura 9 identifica um exemplo de gráfico para cálculo da escala de flutuação, cujo eixo da ordenada representa a autocorrelação e cujo eixo das abscissas, a distância de separação. A área hachurada corresponde à escala de flutuação e destaca-se que a área compreende a primeira área positiva até que ela se torne negativa (SALGADO; PREZZI; GANJU, 2015).

$$\theta = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \rho d\pi \quad (13)$$

Onde:

θ é a escala de flutuação.

ρ é a função de autocorrelação.

Para a obtenção da função autocorrelação (ρ), é necessário primeiro calcular a covariância, que visa capturar o grau de correlação entre os valores de X nos pontos x_i e x_{i+j-1} distantes τ_j para todos os valores de i em uma faixa de interesse, como demonstra a Equação 14 (SALGADO; PREZZI; GANJU, 2015).

$$C(\tau_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-j+1} (x_i - \mu_X)(x_{i+j-1} - \mu_X) \quad (14)$$

Onde:

$C(\tau_j)$ é a covariância.

μ_X é a média de X .

$j \geq 1$ é um inteiro relacionado com a distância de separação como mostra a Equação 15.

$$\tau_j = (j - 1)\Delta z \quad (15)$$

Onde:

τ_j é a distância de separação.

Δz é a distância mínima entre dois pontos consecutivos.

Por fim, a função autocorrelação para um campo aleatório é dada pela Equação 16 (SALGADO; PREZZI; GANJU, 2015).

$$\rho(\tau_j) = \frac{C(\tau_j)}{C(\tau_1)} \quad (16)$$

Onde:

$\rho(\tau_j)$ é a função autocorrelação.

$C(\tau_j)$ é covariância com distância de separação τ_j .

$C(\tau_1)$ é covariância a uma distância de separação nula.

2.3.3 Adequação do Modelo de Autocorrelação (AMA)

O terceiro e último método de obtenção da escala de flutuação levantado é a AMA. Segundo Kenarsari, Chenari e Eslami (2013), esse método envolve a técnica de encontrar funções teóricas que melhor descrevem as função autocorrelação dos dados. Essas funções teóricas são modelos matemáticos que constam na Tabela 4, adaptada de Cami *et al.* (2020), na qual também apresenta-se um levantamento de frequência de utilização, destacando que a função exponencial mostrou maior adequação aos dados dos autores. A função teórica de autocorrelação deve ser comparada de forma

direta com os valores experimentais calculados com a Equação 16.

Tabela 4: Modelos de autocorrelação usuais e suas frequências de utilização

Modelo de autocorrelação	Função de autocorrelação	Frequência usada (%)
Exponencial	$\rho(\tau) = \exp\left(\frac{-2 \tau }{\theta}\right)$	48
Markov de segunda ordem	$\rho(\tau) = \left(1 + 4\frac{ \tau }{\theta}\right) \exp\left(-4\frac{ \tau }{\theta}\right)$	5
Exponencial quadrado	$\rho(\tau) = \exp\left(-\pi\left(\frac{ \tau }{\theta}\right)^2\right)$	19
Cosseno exponencial	$\rho(\tau) = \exp\left(-\frac{ \tau }{\theta}\right) \cos\left(\frac{ \tau }{\theta}\right)$	8

Nota: θ é a escala de flutuação; τ é a distância de separação; ρ é a função de autocorrelação.

Fonte: Cami *et al.* (2020).

2.3.4 Valores de referência para a escala de flutuação

Realizado o levantamento de metodologias para obtenção da escala de flutuação vertical, foi feita também uma pesquisa para verificação de referências de valores para posterior comparação com os resultados do presente trabalho. A Tabela 5 e a Tabela 6 identificam valores típicos encontrados para escalas de flutuação de materiais arenosos e argilosos a partir de ensaios de laboratório e de campo. Observa-se que escalas da ordem de 0,3m a 8,6m podem ser encontradas para escalas de flutuação verticais. Em contrapartida, foram encontradas escalas de flutuação horizontais de 3m a 80m, ou seja, há uma tendência de caracterização de escalas horizontais superiores às verticais. Característica que é justificada pela tendência de criação de camadas horizontais homogêneas devido ao processo de intemperismo e/ou sedimentação. As tabelas mostram um recorte típico obtido dos trabalhos de Uzielli *et al.* (2007) e Phoon e Kulhawy (1999), porém faixas similares são comuns na literatura da área (ZHANG *et al.*, 2021). Outro destaque a ser feito é que a escala de flutuação horizontal apresenta maior dificuldade de ser obtida, uma vez que há menor quantidade de coleta de dados na direção horizontal do que na direção vertical (CAMI *et al.*, 2020).

Tabela 5: Valores de referência para escala de flutuação.

Propriedade	Tipo de solo	Método de ensaio	Esc. horizontal (m)	Esc. vertical (m)
S_u	Argila	Laboratório	-	0,8-8,6
S_u	Argila	Palheta	46,0-60,0	2,0-6,2
q_c	Areia e argila	CPT	3,0-80,0	0,1-3,0
q_t	Argila	CPTu	23,0-66,0	0,2-0,5
f_s	Areia	CPT ²	-	1,3

Adaptado de: Uzielli *et al.* (2007).

²Do inglês, *Cone Penetration Test*

Tabela 6: Valores de escala de flutuação para propriedades geotécnicas.

Propriedade	Tipo de solo	Número de estudos	Intervalo	Média
Esc. de flutuação vertical (m)				
S_u	Argila	5	0,8-6,1	2,5
q_c	Areia e argila	7	0,1-2,2	0,9
q_t	Argila	10	0,2-0,5	0,3
S_u	Argila	6	2,0-6,2	3,8
Esc. de flutuação horizontal (m)				
q_c	Areia e argila	11	3,0-80,0	47,9
q_t	Argila	2	23,0-66,0	44,5
S_u	Argila	3	46,0-60,0	50,7

Adaptado de: Phoon e Kulhawy (1999).

2.4 TEORIA DOS CAMPOS ALEATÓRIOS

A teoria de campos aleatórios busca modelar padrões de variabilidade complexos e de interdependência em casos nos quais o tratamento determinístico é ineficiente e a estatística convencional, insuficiente. Um modelo de campo aleatório ideal deve representar as características de um fenômeno aleatório complexo em termos de um número mínimo de parâmetros significativos e experimentalmente acessíveis (VANMARCKE, 1983).

Vanmarcke (1983) destaca algumas aplicações para campos aleatórios no gerenciamento de segurança em barragens. Na área de geotecnologia, os parâmetros utilizados podem ser densidade, porosidade e permeabilidade de aterros e solos de fundação, poropressão, quantidade e velocidade de infiltração e, por fim, compressibilidade e resistência do solo.

De acordo com Baecher e Christian (2003), a teoria do campo aleatório é importante por duas razões: primeiro, proporciona resultados estatísticos que podem ser usados para representar as observações de campo e planejar estratégias de amostragem espacial e, segundo, possibilita a incorporação da variabilidade espacial na engenharia e em modelos de confiabilidade.

A aplicação da teoria em problemas geotécnicos baseia-se no pressuposto que a variável de interesse, $Z(x)$, é espacial e resultado do processo aleatório. Quando esse processo é definido no espaço x pertencente a S , a variável $z(x)$ faz parte de um processo estocástico (BAECHER; CHRISTIAN, 2003).

Fenton e Griffiths (2008) colocam que, para simplificar a caracterização do problema, são feitas comumente três considerações:

- Normalidade: a distribuição de probabilidade conjunta é um processo normalmente distribuído. A grande vantagem desse processo gaussiano é que a distribuição completa pode ser caracterizada somente com o vetor média e uma matriz covariância.
- Estacionariedade: A Função Densidade de Probabilidade (FDP) independe da posição espacial,

depende apenas da posição relativa entre os pontos. Essa consideração implica que a média, covariância e os momentos de ordem maior são constantes no tempo e no espaço. E, como consequência, a FDP também será constante no tempo. Dessa forma, a segunda consideração leva em conta a estacionariedade.

- Isotropia: em campos aleatórios de duas ou mais dimensões, a isotropia resulta na não variação sob rotação. Assim, um campo aleatório isotrópico significa que a correlação entre dois pontos depende apenas da distância entre eles, não da sua orientação global.

Uma observação feita por Fenton e Griffiths (2008) é que muitas vezes as propriedades do solo não são modeladas corretamente pela distribuição normal ou gaussiana. Um exemplo seria o caso de aparecimento de valores negativos para o módulo elástico, em que esse resultado não teria significado físico. Para propriedades do solo não negativas, os autores recomendam o uso de uma distribuição não gaussiana, como a FDP lognormal. No entanto, afirmam também que a distribuição normal é mais desejável devido à sua simples caracterização e à sua natureza probabilística simples.

Fenton e Griffiths (2008) ainda apontam que, para a caracterização de um campo aleatório gaussiano e estacionário, são necessários três parâmetros:

- Média do campo.
- Variância do campo.
- Taxa de variação com que o campo varia no espaço.

Os autores ainda colocam que a média do campo aleatório e a função covariância podem ser caracterizados como primeiro e segundo momento, respectivamente. Além disso, este último é equivalente à função densidade espectral ou função variância (FENTON; GRIFFITHS, 2008).

Complementarmente aos pontos levantados por Fenton e Griffiths (2008), Baecher e Christian (2003) acrescentam mais três pontos no que diz respeito a campos aleatórios gaussianos e suas propriedades convenientes:

- São completamente caracterizados pelos momentos de primeira e segunda ordem: média e função autocovariância no caso com univariável e vetor média, matriz ou função covariância para o caso multivariável.
- Qualquer subconjunto de variáveis do vetor também é conjuntamente gaussiano.
- As distribuições de probabilidade condicional de quaisquer duas variáveis ou vetores são também distribuídas normalmente.
- Se duas variáveis são gaussianamente bivariáveis e se sua covariância for igual a zero, então as variáveis são independentes.

2.4.1 Métodos de modelagem da variabilidade espacial

No presente item, são apresentados os métodos de criação de campos aleatórios mais utilizados em aplicações geotécnicas. Have (2015) aponta que há duas classes de métodos para geração de campos aleatórios. Na classe 1, geradores de variáveis aleatórias espacialmente correlacionadas são combinados com um método de discretização. Para cada nó na malha de campo aleatório, uma variável aleatória é avaliada, a qual é correlacionada com os outros nós no campo aleatório. Essas variáveis aleatórias espacialmente correlacionadas devem ser alocadas a um elemento ou ponto de integração no modelo de elemento finito. Isso pode ser feito com diferentes métodos de discretização. A classe 2 abrange os métodos de expansão em série. O campo aleatório é representado por uma soma de funções que são multiplicadas por uma variável aleatória. Esses métodos resultam em um campo contínuo.

Liu *et al.* (2019) realizaram uma revisão dos avanços na geração de campos aleatórios, em que os métodos de geração de campos abordados pertencem à classe 1. Baecher e Christian (2003) informam que as duas abordagens mais populares de geração de campos aleatórios são TBM (do inglês, *Turning Bands Method*) e LAS (do inglês, *Local Average Subdivision*). Fenton e Griffiths (2008) apresentam em seu livro cinco metodologias além das duas já citadas: MA (do inglês, *Moving-Average Method*), CMD (do inglês, *Covariance Matrix Decomposition*), DFT (do inglês, *Discrete Fourier Transform Method*) e FFT (do inglês, *Fast Fourier Transform Method*). Os mesmos autores também apresentam em seu livro a descrição da metodologia de geração de alguns desses campos: MA, CMD, DFT, FFT, TBM e, com mais detalhes, LAS.

A partir da literatura, foram selecionados três métodos que constaram nos levantamentos dos autores e que são descritos na sequência: TBM, FFT e LAS. Além disso, esses métodos foram os mais discutidos por Fenton e Griffiths (2008).

Turning Band Method (TBM)

O método TBM cria um campo aleatório por meio de linhas no espaço, nas quais são atribuídos parâmetros seguindo critérios estatísticos de distribuição. Diferentes linhas são geradas e intercruzadas para a formação de um campo bidimensional ou tridimensional.

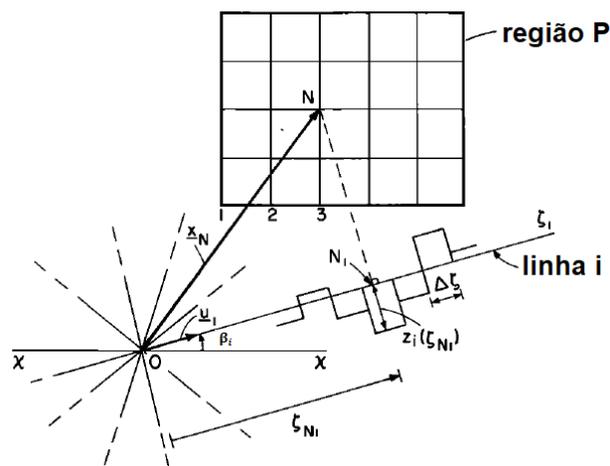
Matheron (1973) foi o primeiro autor a sugerir a geração do método para casos de duas e três dimensões. Mantoglou e Wilson (1982) deram prosseguimento na metodologia focando em sua aplicação para hidrologia. Além disso, os autores conceituam o método como a simulação de dimensões superiores ao utilizarem uma sequência de simulações unidimensionais equivalentes. Ao realizá-las, os autores identificaram a manutenção das estatísticas do campo verdadeiro, e comprovaram um custo computacional menor do que outros métodos espectrais até então apresentados. Uma função de covariância unidimensional é utilizada, que corresponde ao campo bidimensional ou

tridimensional. Com isso, a cada ponto da dimensão superior, uma soma ponderada dos valores correspondentes é atribuída ao cálculo da geração de campo.

Como contraponto, Liu *et al.* (2019) indicaram que não é exato. Identificaram duas fontes de erros, primeiramente a geração de um número finito de linhas. A segunda fonte é que o processo contínuo é aproximado por bandas discretas de cada linha. Para cada ponto no espaço, pode ser gerada a projeção em cada linha com precisão, mas o custo computacional pode vir a ser um impeditivo.

Mantoglou e Wilson (1982) descrevem um exemplo da metodologia empregada na Figura 10, na qual a região P é o campo dimensional que se deseja simular gerando nele valores em pontos discretos. Deve ser arbitrada uma origem O em um espaço bidimensional. Em seguida, devem ser geradas linhas centradas em O e com vetores \vec{u} radiais e uniformemente distribuídos formando um círculo, conforme a Figura 10.

Figura 10: Exemplo de geração de um campo com TBM.



Fonte: Mantoglou e Wilson (1982).

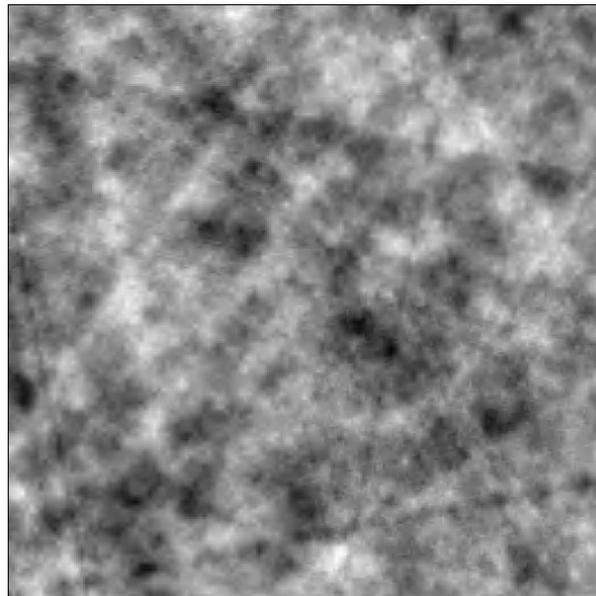
O ângulo β_i é formado entre a linha i e um eixo fixo x , θ varia então entre 0 e 2π . Ao longo de cada linha i , deve ser gerado um processo estacionário de segunda ordem unidimensional e discreto, que possui média igual a zero e função covariância $C_1(\xi)$. Na linha i , devem ser projetados esses pontos do campo onde se deseja gerar os valores e atribuir a cada um deles os valores correspondentes do processo discreto unidimensional (MANTOGLOU; WILSON, 1982).

Como exemplo na Figura 10, é identificado o ponto N situado na região P, que possui o vetor de localização \vec{x}_N , então o valor atribuído a ele da linha i será $z_i(\xi_{Ni})$ onde $\xi_{Ni} = \vec{x}_N \times \vec{u}_i$ é a projeção do vetor \vec{x}_N na linha i e u_i é o vetor unitário na linha i e, por fim, $\vec{x}_N \times \vec{u}_i$ representa o produto entre os vetores. Esse processo deve ser realizado L vezes, quantas vezes se desejar (MANTOGLOU; WILSON, 1982).

A escolha do número de linhas leva em consideração a acurácia desejada. Os autores sugerem

uma quantidade entre 4 e 16, com base em suas experiências em aplicações de hidrologia. Fenton e Griffiths (2008) mostram que campos gerados com 16 e até 32 linhas não foram adequados para seu caso, pois este aparenta ter linhas cruzando o campo (Figura 11). No caso do campo de 64 linhas, não é mais possível percebê-las. Além disso, ressaltam que a visibilidade dessas linhas pode levar a interpretações errôneas. Assim, quanto mais linhas, melhor o modelo e, em contrapartida, maior o tempo de processamento do campo.

Figura 11: Exemplo de campo aleatório TBM gerado com apenas 16 linhas.



Fonte: Fenton e Griffiths (2008).

Para cada ponto N da região P , haverá L valores atribuídos $z_i(\xi_{Ni}) = z_i(\vec{x}_N \times \vec{u}_i)$, onde i varia de 1 até L . Por fim, designa-se para cada ponto N o valor dado pela Equação 17.

$$z_s(x_N) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^L z_i(\vec{x}_N \times \vec{u}_i) \quad (17)$$

Onde:

$z_s(x_N)$ é o processo unidimensional.

L é o número de linhas.

Estabelecido como calcular no geral os valores do campo, precisa ser definida agora a equação das linhas a serem geradas. Mantoglou e Wilson (1982) informam que há uma dificuldade de obter a função covariância bidimensional a partir da função unidimensional correspondente. Os autores sugerem o uso da função de densidade espectral radial. Dessa forma, apresentam em uma tabela funções de covariância bidimensionais. Há o modelo de covariância exponencial simples (Equação

18) e dupla (Equação 19).

$$C(r) = \sigma \exp(-br) \quad (18)$$

$$C(r) = \sigma^2 \exp(-b^2 r^2) \quad (19)$$

Onde:

r = distância entre dois pontos.

σ^2 = variância do processo.

b^{-1} = comprimento de correlação (m).

Fast Fourier Transform Method (FFT)

A FFT calcula a DFT de alguma sequência, em que a DFT é uma ferramenta para converter tipos específicos de sequências de funções em outros tipos de representações, como o valor do campo aleatório. Outra maneira de explicar a DFT é que ela transforma a estrutura do ciclo de uma forma de onda em componentes senoidais.

O método de Fourier, desenvolvido por Cooley e Tukey (1965), pode ser usado caso o espaço e a frequência possam ser discretizados em pontos equidistantes. Segundo Fenton e Griffiths (2008), a maior vantagem do método é que possibilita lidar com campos anisotrópicos sem sacrificar a eficiência. Uma de suas desvantagens é necessitar de uma malha igualmente espaçada.

Com $j = 0, 1, 2, \dots, K - 1$, a transformada de Fourier (Equação 20) pode ser avaliada utilizando-se o algoritmo FFT, em que K é a frequência e deve ter mesmo número de pontos que o tamanho do campo aleatório.

$$Z_j = \sum_{k=0}^{K-1} \chi_k e^{i(2\pi jk/K)} \quad (20)$$

Onde:

$$\chi_k = A_k - iB_k.$$

$$A_K = \frac{1}{K} \sum_{j=0}^{K-1} Z_j \cos(2\pi \frac{jk}{K}) = A_{K-k}.$$

$$B_K = \frac{1}{K} \sum_{j=0}^{K-1} Z_j \sin(2\pi \frac{jk}{K}) = -B_{K-k}.$$

A_k e B_k precisam apenas ser gerados randomicamente para $k = 0, 1, \dots, K/2$. Nota-se que $K - k$ são reproduzidos independentemente do coeficiente em k . Para geração de A_k e B_k também

é necessário calcular suas variâncias a depender do valor de k , como identificado abaixo.

$$Var[A_k] = \begin{cases} \frac{1}{2}G(\omega_k)\delta\omega & \text{se } k = 0 \\ \frac{1}{4}[G(\omega_k) + G(\omega_{K-k})]\delta\omega & \text{se } k = 1, \dots, \frac{1}{2}K - 1 \\ G(\omega_k)\delta\omega & \text{se } k = \frac{1}{2}K \end{cases}$$

$$Var[B_k] = \begin{cases} 0 & \text{se } k = 0, \frac{1}{2}K \\ \frac{1}{4}[G(\omega_k) + G(\omega_{K-k})]\delta\omega & \text{se } k = 1, \dots, \frac{1}{2}K - 1 \end{cases}$$

Onde:

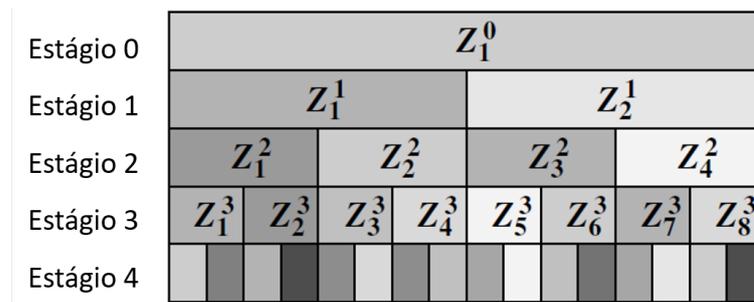
$G(\omega_k)$ é a função densidade espectral unilateral.

Local Average Subdivision (LAS)

Esse método de geração de campo aleatório foi inicialmente proposto por Fenton e Vanmarcke (1990). Fenton e Griffiths (2008) introduzem a metodologia explanando que sua motivação surgiu da necessidade de considerar propriamente que a maioria das propriedades de engenharia são médias locais. Além disso, apontaram que provavelmente esse método seja o mais difícil de implementar e, no entanto, o mais fácil de usar.

Na abordagem LAS, preservar a consistência interna implica na manutenção da média local em toda a subdivisão. Dessa forma, a Figura 12 ilustra a propriedade de um material que sofre um processo de subdivisão em quatro estágios. A cada um desses estágios, células são divididas em duas, e cada uma dessas células recebe um valor randômico, cujas médias locais devem ser médias para o valor global. Portanto, ao final, a média global permanece constante. Esse seria o processo para obtenção de campo aleatório de uma dimensão, mas o conceito é mantido para campos de maiores dimensões.

Figura 12: Conceito da metodologia LAS para campo de uma dimensão.



Fonte: Fenton e Griffiths (2008).

Para o caso de duas dimensões, a célula-pai é dividida em quatro células-filha. Nesse processo todas as células são divididas, mas para facilitar a compreensão, os autores exemplificam a subdivisão da célula Z_5^i . Portanto, cada célula-pai é simbolizada como Z_l^i , com $l = 1, 2, \dots$, dividida em células-filha denotadas como Z_j^{i+1} com $j = 1, 2, 3, 4$. Na notação vetorial: $Z^{i+1} = \{Z_1^{i+1} + Z_2^{i+1} + Z_3^{i+1} + Z_4^{i+1}\}$, os valores da coluna vetorial são obtidos ao adicionar um termo médio em um componente aleatório. O termo médio provém de uma estimativa linear não enviesada de uma vizinhança 3x3 de células-pai, nesse caso, o vetor coluna $Z^i = \{Z_1^i, \dots, Z_9^i\}$. A Equação 21 resume o processo.

$$Z^{i+1} = A^T Z^i + LU \quad (21)$$

Onde:

U é o vetor randômico com $N(0,1)$ elementos independentes.

A e L são matrizes definidas pelas seguintes matrizes covariância R , S e B (obtidas pela Equação 22, Equação 23 e Equação 24, respectivamente), que devem ser calculadas como as covariâncias entre as médias locais sobre os domínios das células-pai e filha. Isso pode ser feito utilizando-se uma função variância ou uma função que usa a regra de quadratura gaussiana.

$$R = E[Z^i Z^{iT}] \quad (22)$$

$$S = E[Z^i Z^{i+1T}] \quad (23)$$

$$B = E[Z^{i+1} Z^{i+1T}] \quad (24)$$

Dessa forma, a matriz A é definida conforme a Equação 25:

$$A = R^{-1}S \quad (25)$$

Por sua vez, a matriz triangular inferior L deve satisfazer a Equação 26:

$$LL^T = B - S^T A \quad (26)$$

Desse modo, a Equação 21 pode ser resolvida como:

$$Z_1^{i+1} = \sum_{l=1}^9 A_{l1} Z_l^i + L_{11} U_1 \quad (27)$$

$$Z_2^{i+1} = \sum_{l=1}^9 A_{l2} Z_l^i + L_{21} U_1 + L_{22} U_2 \quad (28)$$

$$Z_3^{i+1} = \sum_{l=1}^9 A_{l3} Z_l^i + L_{31} U_1 + L_{32} U_2 + L_{33} U_3 \quad (29)$$

$$Z_4^{i+1} = 4Z_5^i - Z_1^{i+1} - Z_2^{i+1} - Z_3^{i+1} \quad (30)$$

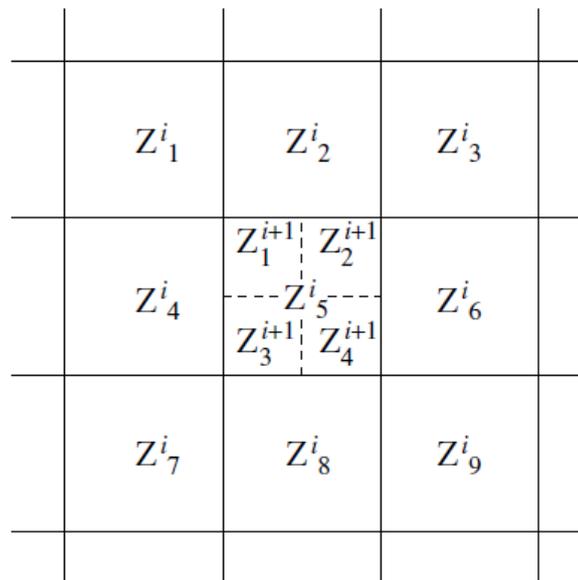
Onde:

U_i são três variáveis independentes normalmente distribuídas.

9 e 1 apresentam o intervalo do somatório, em que o limite superior decorre da consideração dos elementos vizinhos, conforme a Figura 13.

A Figura 13 espacializa as variáveis Z^i da Equação 27, Equação 28, Equação 29 e Equação 30.

Figura 13: Metodologia LAS para duas dimensões.



Fonte: Fenton e Griffiths (2008).

Comparação dos métodos

Um resumo de métodos como abordados neste item (2.4.1) foi realizado por Phoon e Ching (2015): o procedimento analítico deve atribuir a cada elemento do campo valores das propriedades

aleatórias que satisfaçam as distribuições de probabilidade subjacentes e retenham a estrutura de correlação. Os autores apontam que cada uma dessas metodologias tem vantagens e desvantagens, e ponderam que não há consenso sobre o melhor método a ser utilizado. Então, realizada a demonstração das metodologias, foram levantados pontos favoráveis e contrários para a geração de campos.

Gutjahr, Bullard e Hatch (1997) afirmam que o TBM requer cuidado na seleção do número de linhas e do espaçamento ao longo das linhas para evitar listras, como pôde ser visualizado na Figura 11. Isso também é discutido por Fenton e Griffiths (2008) quando indicam número mínimo de linhas para geração do campo, considerando que quanto mais linhas são geradas, maior o tempo de processamento, e ponderam que provavelmente é o método mais preciso.

No caso do método FFT, Gutjahr, Bullard e Hatch (1997) apontam que uma de suas desvantagens é que o método requer elementos com espaçamentos iguais. Além disso, atenção deve ser dada ao selecionar a dimensão do campo físico e o intervalo de discretização para garantir que a função de densidade espectral seja adequadamente aproximada. Este último problema torna o método mais difícil de usar na prática (FENTON; GRIFFITHS, 2008).

Para o método LAS, Fenton e Griffiths (2008) declaram que, dos três métodos considerados, o método LAS é o mais difícil de implementar. No entanto, é um dos mais fáceis de usar uma vez codificado, pois não requer decisões sobre seus parâmetros e geralmente é o mais eficiente. Se o problema em questão requer ou se beneficiaria de uma representação média local, então o método LAS é a escolha lógica.

Fenton e Griffiths (2008) evidenciam que a eficiência do gerador de campo aleatório muitas vezes não é uma preocupação primordial - em muitas aplicações, o tempo gasto para gerar o campo é diminuído pelo tempo gasto para subsequentemente processar ou analisar o campo, por exemplo, usando método de elementos finitos. Mudanças substanciais na eficiência do gerador dificilmente podem ser notadas pelo usuário.

Portanto, não há um consenso definido de qual metodologia é a mais indicada para ser utilizada na geração de campos aleatórios. Dessa forma, foi realizada uma revisão das metodologias utilizadas na aplicação dos campos em estabilidade de talude, objeto de estudo do presente trabalho.

2.5 USO DE CAMPO ALEATÓRIO EM ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE

As propriedades naturais do solo variam consideravelmente no espaço, mesmo dentro de uma única camada de solo, segundo Jha e Ching (2013). Nas análises tradicionais de estabilidade de taludes, o fator de segurança (FS) é calculado usando valores nominais para os parâmetros do solo, e a decisão é tipicamente tomada com base neste FS nominal. No entanto, devido à variabilidade

especial das propriedades do solo, o FS nominal pode não refletir o estado real de segurança de um talude. Para levar em conta tal variabilidade, uma análise de estabilidade probabilística é preferível quando o *status* de segurança é quantificado pela probabilidade de falha (JHA; CHING, 2013).

Ainda segundo Jha e Ching (2013), um método mais robusto para avaliar a estabilidade de taludes é o método de elementos finitos aleatório, ou RFEM (do inglês, *Random Finite Element Method*), de Fenton e Griffiths (2008). Complementam que o método combina a teoria de campo aleatório com a análise de elementos finitos elasto-plásticos para explicar o efeito da variabilidade espacial. Destacam que o RFEM captura bem o efeito da variabilidade espacial do solo e é capaz de simular mecanismos complexos de falha. Ademais, descrevem suas aplicações: a abordagem tem sido usada para quantificar a probabilidade de falha de declives e mostram que ela pode diferir significativamente daquela obtida usando um método de equilíbrio limite (JHA; CHING, 2013).

Quando utilizado o método de elementos finitos, a probabilidade de falha pode ser calculada pelo número de modelagens de insucesso, casos de não convergência numérica, por exemplo, adotando um limite de iterações. Todavia, essa quantificação fica limitada à análise de seções possíveis e seções que apresentam instabilidade numérica. Para quantificar um fator de capacidade de estabilidade, ou seja, um fator de segurança, ou fator de redução de parâmetros, a abordagem SRF (do inglês, *Strength Reduction Factor*) pode ser utilizada. O método consiste em dividir os parâmetros de resistência por fatores parciais, de acordo com a Equação 31 e a Equação 33. Nesse sentido, Dyson e Tolooiyan (2018) constextualizam o SRFEM (do inglês, *Strength Reduction Finite Element Method*), que é o cálculo do fator de redução em simulações de método de elementos finitos, que também aplicado por Wang *et al.* (2020).

$$c_f = \frac{c}{SRF} \quad (31)$$

$$\phi_f = tg^{-1} \left(\frac{tg\phi}{SRF} \right) \quad (32)$$

$$c_{uf} = \frac{c_u}{SRF} \quad (33)$$

$$SRF = FS \quad (34)$$

Onde:

c_f é a coesão fatorada.

ϕ_f é o ângulo de atrito fatorado.

c_{uf} é a resistência de cisalhamento fatorada.

SRF é o fator de redução adotado para a divisão dos parâmetros de resistência, que ao final do cálculo, o fator representa o FS.

Wang *et al.* (2020) complementarmente afirmam que, no momento em que o SRF ultrapassa o

valor crítico, o deslocamento horizontal do solo no topo da encosta aumenta rapidamente e então o algoritmo de elementos finitos não consegue encontrar uma solução para atender simultaneamente o equilíbrio estático e o critério de falha estabelecido (Mohr-Coulomb, por exemplo) a partir do cálculo numérico dentro de um número prescrito de iterações.

Além do cálculo do FS para estabilidade de taludes, outro possível cálculo é o de probabilidade de falha. Nesse caso, é preciso verificar apenas a estabilidade, e Dyson e Tolooiyan (2018) apresentam três critérios de falha para determinação de rompimento de talude:

- Desenvolvimento de zonas plásticas da base ao topo do talude.
- Grandes deformações, descritas frequentemente por níveis de tolerância definidos por usuários de deslocamento nodal dependente do problema específico.
- Solução não convergente, frequentemente indicativa de falha em simulações de estabilidade de talude por método dos elementos finitos.

A Tabela 7 identifica referências que utilizaram campos aleatórios em casos de estabilidade de taludes que foram encontradas no decorrer da pesquisa. A primeira coluna identifica o método de geração de campo aleatório e salienta-se que o RFEM aplica o método já apresentado anteriormente, o LAS. Ainda assim, o *software* RFEM de Fenton e Griffiths (2008) é melhor apresentado no capítulo 3. A função densidade de probabilidade da variável aleatória também é identificada. Por fim, consta também a quantidade de simulações realizadas pelos autores para uma análise estatística, e que em alguns casos foi obtida uma probabilidade de falha e em outras, um FS.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 7, verifica-se que os modelos de geração de campos aleatórios mais utilizados são os baseados em LAS (RFEM) com variáveis aleatórias de resistência, resistência não drenada (S_u), coesão (c), e ângulo de atrito (ϕ) e módulo de elasticidade (E). Além disso, a FDP lognormal é mais utilizadas com modelagens, sob a justificativa maior de não se obter valores negativos para os elementos do campo. Ressaltam-se também os números de simulações de 600 a 60.000.

Tabela 7: Informações de trabalhos que analisaram estabilidade de taludes.

Geração de campos	MEF	Variável aleatória	FDP	Qtd. simulações	Referência
RFEM	RFEM	S_u	Lognormal	2.000 e 5.000	Griffiths, Huang e Fenton (2009)
<i>Fourier series method</i>	Abaqus	S_u	Lognormal	100 para cada análise	Jha e Ching (2013)
RFEM	-	S_u	Lognormal	60.000 e 2.300	Li <i>et al.</i> (2015)
<i>Matrix De-composition Method</i>	Abaqus	S_u e E	Weibull	1.000	Marton e Penriya (2015)
RFEM	RFEM	S_u	Lognormal	2.000	Zhu <i>et al.</i> (2015)
<i>Cholesky de-composition</i>	-	c , ϕ e S_u	Lognormal	2.000	Jiang e Huang (2016)
RFEM	RFEM	S_u	Lognormal	20.000	Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017)
RFEM	Abaqus	S_u	Lognormal	600	Liu <i>et al.</i> (2018)
<i>Midpoint method</i>	-	S_u	Lognormal	2.000	Jiang, Papaioannou e Straub (2018)
RFEM	Abaqus	c , ϕ e S_u	Lognormal	1.000	Wang <i>et al.</i> (2020)

Cabe destacar que nos trabalhos apresentados na Tabela 7, como em muitos casos da literatura, a função densidade de probabilidade é apenas adotada e não analisada a partir de dados reais. Nesse sentido, procurou-se encontrar na literatura fontes complementares que apresentassem análise estatística para as distribuições. A Tabela 8 de Baecher e Christian (2003) reúne resultados de outros autores e apresenta as funções densidade de probabilidade para algumas propriedades de solo.

Tabela 8: Referência de FDP para propriedades do solo

Propriedade	Tipo de solo	FDP	COV(%)
Resistência do cone	Areia, argila	Lognormal	-
	Argila	Normal/Lognormal	-
Resistência ao cisalhamento não drenada	Argila (triaxial)	Lognormal	5-20
	Argila	Lognormal	10-35
	Silte argiloso	Normal	10-30
Razão S_u/σ'_{v0}	Argila	Normal/Lognormal	5-15

Adaptada de: Baecher e Christian (2003).

Posteriormente à modelagem do talude para obtenção dos resultados de probabilidades de falha, são necessárias comparações entre os valores obtidos e referências para aceitação. Santamarina, Altschaeffl e Chameau (1992) determinam níveis de aceitação conforme condições em que as estruturas se encontram, como identifica a Tabela 9.

Tabela 9: Nível de aceitação de probabilidade de falha

Condição	Probabilidade de falha (P_f)
Inaceitável na maioria dos casos	Maior que 10%
Aceitável na maioria dos casos, exceto no caso de perda de vida	0,1%
Aceitável para todos os taludes	0,01%
Desnecessariamente baixo	0,001% ou menos

Adaptada de: Santamarina, Altschaeffl e Chameau (1992).

3 IMPLEMENTAÇÃO DE CAMPOS ALEATÓRIOS EM CASOS DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Apresentados os aspectos principais da bibliografia acerca de incertezas na geotecnia e modelagem de campos aleatórios, a seguir é explicada a implementação de uma rotina para cálculo da probabilidade de falha de aterros sobre solos moles e de fator de segurança, utilizando elementos finitos, *software* Abaqus e campos aleatórios gerados por meio do método LAS.

Com o objetivo de verificar a metodologia, no presente capítulo, apresenta-se o procedimento utilizado para a implementação de campos aleatórios em casos de estabilidade de taludes. Para a verificação da implementação desenvolvida, foram utilizadas duas pesquisas de referência: Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017) e Liu *et al.* (2018), em que ambos apresentam aplicações de campos aleatórios em estabilidade de taludes. O primeiro trabalho evidencia um problema típico, descrito também em Fenton e Griffiths (2008). Além disso, os autores utilizaram rotinas de RFEM de Fenton e Griffiths (2008) para caracterização do campo aleatório e cálculo de probabilidade de falha de um talude em solo argiloso com comportamento não drenado. Já a segunda pesquisa também apresentaram abordagem aplicada à estabilidade de taludes argilosos e comportamento não drenado, no entanto, os autores utilizam a proposta de Fenton e Griffiths (2008) apenas para a caracterização do campo aleatório. O cálculo de Fator de Segurança é obtido no trabalho de Liu *et al.* (2018) por meio de implementação no *software* Abaqus.

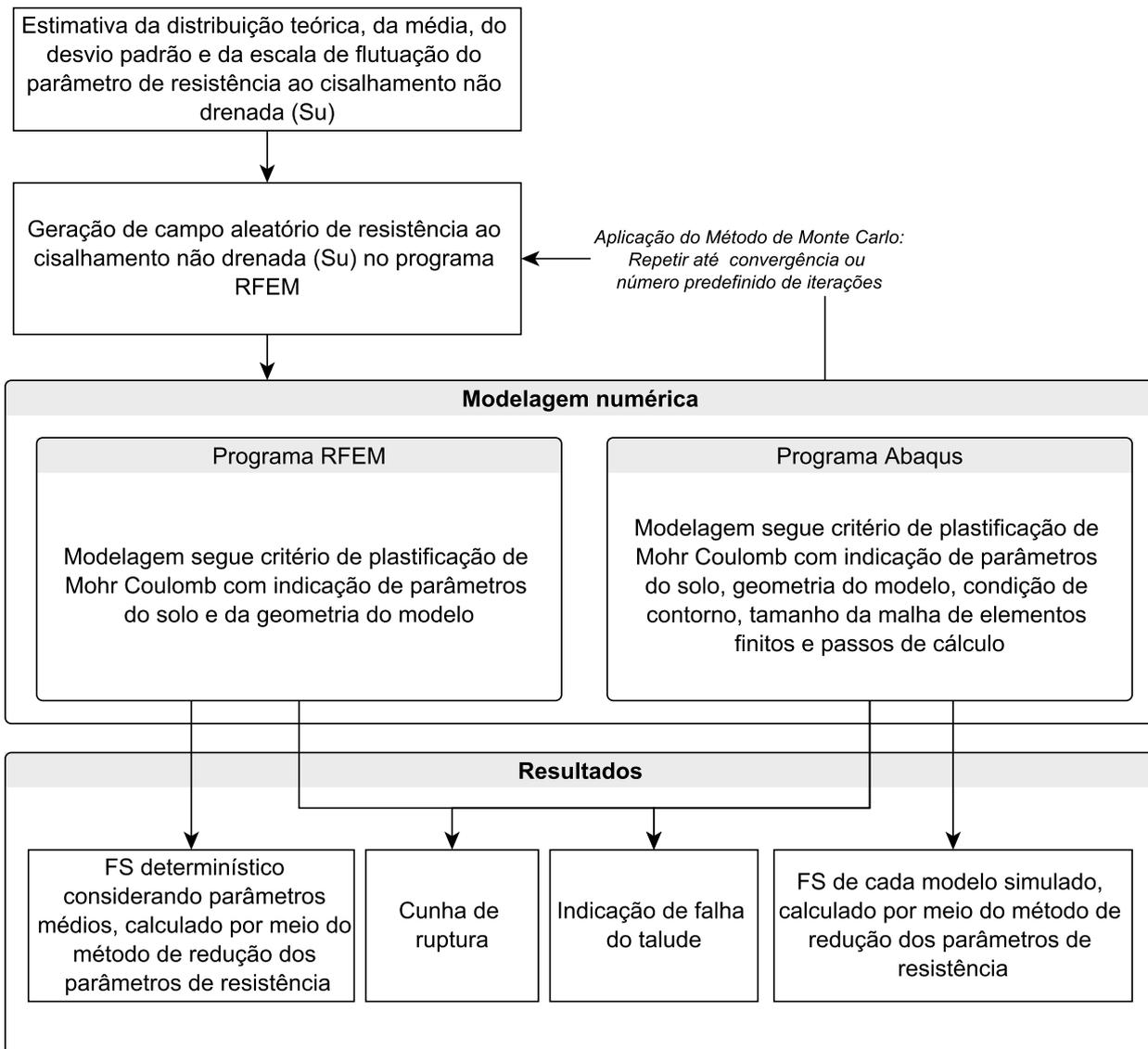
Os trabalhos foram selecionados por apresentarem metodologias similares à adotada no presente trabalho, além de terem informação suficiente para implementação. Dessa forma, nas seções seguintes são apresentadas, inicialmente, a implementação da metodologia aplicada, a identificação dos casos e seus respectivos resultados, seguidos por considerações dos detalhes da implementação e comparação com a bibliografia. No final do capítulo, são feitas as considerações acerca das limitações e dificuldades encontradas.

3.1 IMPLEMENTAÇÃO

Esse subcapítulo tem como objetivo apresentar a metodologia adotada tanto para a implementação das análises comparativas da bibliografia quanto para a implementação do estudo de caso. Dessa forma, buscou-se uma explicação mais ampla, mas que atendesse a todos os casos. Mesmo assim, apontamentos de particularidades foram feitos.

A Figura 14 sintetiza a metodologia utilizada, em que os detalhes dos algoritmos desenvolvidos são apresentados no decorrer do texto.

Figura 14: Metodologia desenvolvida.



Inicialmente, é necessário realizar um levantamento estatístico do parâmetro a ser levado em consideração para geração de campos aleatórios. Como dados de entrada, constaram os parâmetros estatísticos, como média (μ), desvio padrão (σ), escala de flutuação (θ) e distribuição teórica do parâmetro geotécnico cuja variabilidade pretendeu-se testar. Além disso, também indicou-se o tamanho do campo por meio do número de elementos. Em todos os casos, foram gerados campos para a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u).

Na sequência, o campo foi gerado pela metodologia LAS por meio do *software* RFEM³ de Fenton e Griffiths (2008). Essa metodologia foi escolhida porque foi encontrado o *software* livre citado e

³Disponível em: <http://random.engmath.dal.ca/rfem/>

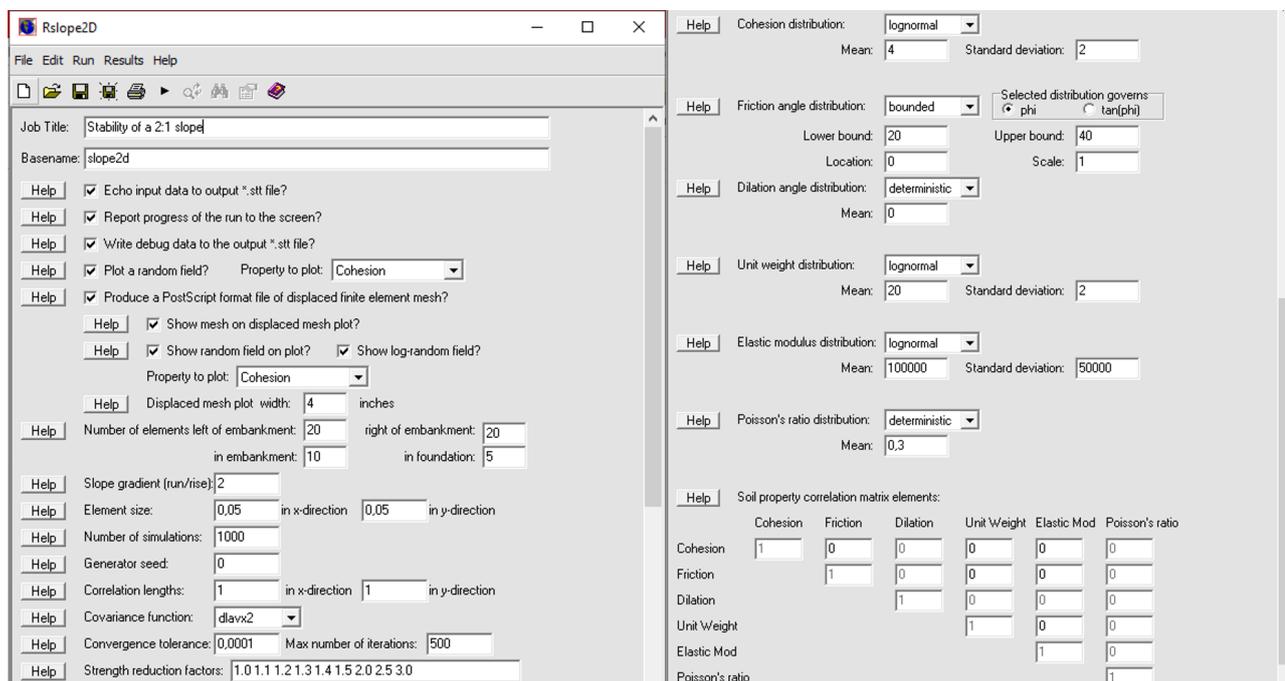
também em razão de, pois segundo a literatura (Tabela 7), ser uma metodologia amplamente utilizada no âmbito da geotecnia.

Um dos módulos oferecidos pode ser utilizado em estabilidade de taludes. Nesse caso, podem ser plotados campos de seis parâmetros do solo: coesão, ângulo de atrito, dilatância, peso específico, módulo elástico e coeficiente de Poisson. São informados como dados de entrada: as dimensões e a inclinação do talude pesquisado, além das dimensões de sua fundação; o número de elementos da malha de campo aleatório; os comprimentos de correlação nas direções horizontal e vertical e a função de covariância. Como dados de entrada, há também a distribuição teórica dos seis parâmetros do solo anteriormente apontados, sua média e desvio padrão. Ademais há a possibilidade de não selecionar uma função distribuição e informar apenas um valor para o parâmetro. Em seguida, duas possibilidades para modelagem numérica do problema de estabilidade foram consideradas: modelagem no *software* RFEM e modelagem no *software* Abaqus.

Modelagem no *software* RFEM

Utilizou-se o *software* RFEM para o cálculo de fator de segurança determinístico e probabilidade de falha. Além de gerar o campo aleatório, o programa associa essa geração ao método de elementos finitos. Para estabilidade de taludes bidimensionais, o número de elementos foi variável de acordo com a seção avaliada, em que a malha de elementos finitos continha elementos quadriláteros de 8 nós. Adotou-se o modelo constitutivo linear elástico com critério de plastificação de Mohr-Coulomb, nesse sentido, foram considerados como dados de entrada: coesão, ângulo de atrito, peso específico, módulo de elasticidade, dilatância e coeficiente de Poisson. Para a modelagem de comportamento não drenado foi considerada a seguinte simplificação $c = S_u$ e $\phi = 0$. A Figura 15 expõe a interface gráfica do programa RFEM.

Figura 15: Interface gráfica do programa RFEM.



Fonte: <http://random.engmath.dal.ca/rfem/>.

Então, a partir da modelagem numérica, foram obtidos três resultados:

- A informação se o talude falha ou não falha, que é determinada pelo programa quando não atingida a convergência após 500 iterações.
- A cunha de ruptura, em caso de falha do talude como *output* no passo de cálculo onde a convergência não foi atingida.
- O FS determinístico considerando os valores médios e utilizando o método de redução dos parâmetros de resistência (SRF).

A probabilidade de falha é calculada por meio da soma dos casos de insucesso sobre o número total de simulações. A estabilização da probabilidade de falha é um dos critérios que balizam a definição do número de repetições. Essa repetição de simulações até a convergência consiste no MMC. Destaca-se ainda, para a utilização da modelagem numérica no RFEM, que o programa solicita também tolerância de convergência e máximo número de iterações por simulação. Fenton e Griffiths (2008) explicam que a falha ocorre quando o solo move-se ao longo de uma superfície de falha, em que esta última é definida numericamente quando a convergência de deslocamento não pode ser alcançada no intervalo de um número de iterações.

Modelagem no *software* Abaqus

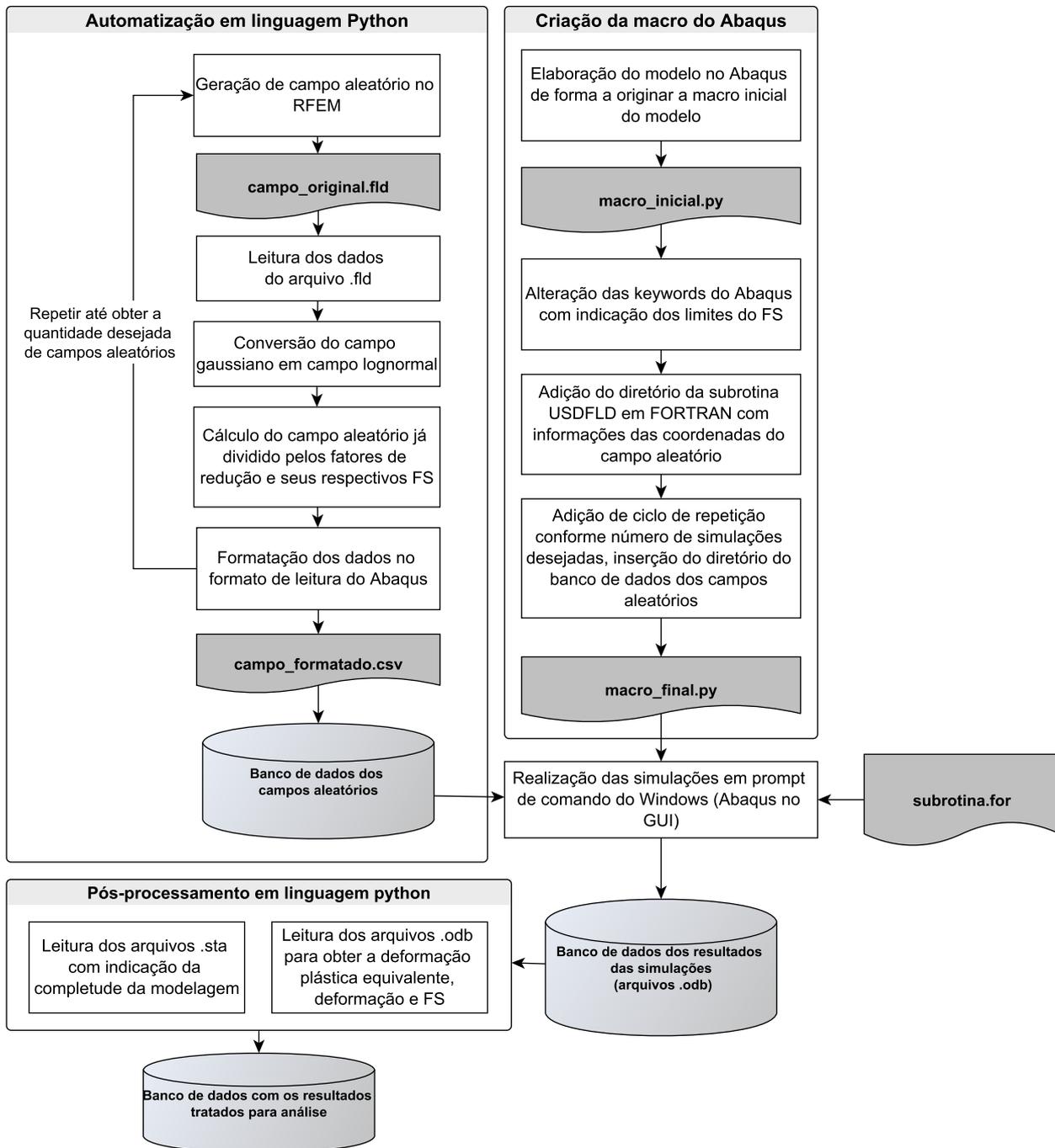
A segunda possibilidade de modelagem numérica, que pode ser observada na Figura 14, foi proporcionada pelo programa Abaqus. Nesse *software*, foram modeladas seções bidimensionais com elementos do tipo CAX4P para os dois modelos retirados da literatura, e no estudo de caso o modelo estará mais detalhado. O elemento CAX4P é utilizado em casos axissimétricos, com quatro nós e deformação bilinear, considerando ainda a poropressão. O número de elementos e os detalhes das seções geométricas podem ser visualizados nos itens subsequentes. O modelo constitutivo linear elástico de Mohr Coulomb foi também considerado, com parâmetros de entrada idênticos aos utilizados em RFEM, a saber, coesão, ângulo de atrito, peso específico, módulo de elasticidade, ângulo de dilatância e coeficiente de Poisson. O campo aleatório gerado na etapa anterior foi introduzido no programa por meio de uma tabela com as coordenadas dos valores da resistência não drenada. Para a modelagem, foi necessária também a geometria do talude, suas condições de contorno, os passos de cálculo e o tamanho da malha de elementos finitos, em que se buscou ser a mesma da malha de campo aleatório. Assim como o RFEM, no Abaqus também resultou em três pontos:

- A informação se o talude falha ou não falha, que foi considerada pela não convergência numérica da seção, em que foi levado em conta o máximo de 100 iterações e com incremento inicial de 10^{-5} , incremento mínimo de 10^{-10} e tamanho máximo de incremento de 0,1.
- A cunha de ruptura, por meio por meio da visualização do *output* de deformação equivalente plástica ou PEEQ (do inglês, *Equivalent plastic strain*).
- O FS calculado também por método de redução dos parâmetros de resistência (SRF), para cada campo aleatório através de implementação numérica.

Para obtenção da probabilidade de falha, foram realizadas $N \times$ simulações e foi verificada a estabilização da probabilidade calculada a partir da razão entre casos de insucesso e casos totais. Frequentemente na bibliografia são utilizadas mais de 1.000 simulações, como visto na seção 2.5. Salienta-se que o programa também solicitou critérios de tolerância de convergência e número máximo de iterações nos passos de cálculo. No entanto, o Abaqus ainda possui internamente critérios de deformação na ordem de 10^{-8} , entre outros critérios preestabelecidos.

Após explanação da implementação de modo amplo, especificam-se as rotinas utilizadas na implementação, e a Figura 16 resume os algoritmos desenvolvidos e os arquivos obtidos em cada etapa.

Figura 16: Implementação do campo aleatório em estabilidade de talude.



O programa RFEM gera os campos aleatórios em arquivos de texto com extensão .fld . No entanto, esse arquivo apresenta o campo gaussiano e em todas as implementações realizadas, a distribuição teórica apontada era a distribuição lognormal. Para transformação do campo normal em lognormal, foi necessário transformar os dados do arquivo .fld por meio da Equação 35, e essa alteração também é apontada por Ali *et al.* (2014).

$$S_{ui} = \exp(\mu_{ln} + (Z(x)_i * \sigma_{ln})) \quad (35)$$

Onde:

S_{ui} é a resistência não drenada de um nó da malha do campo aleatório.

μ_{ln} é a média equivalente para distribuição normal, calculada conforme a Equação 36.

$Z(x)_i$ é o valor gaussiano equivalente obtido para média igual a zero e desvio padrão igual a um.

σ_{ln} é o desvio padrão equivalente para distribuição normal, calculada conforme a Equação 37.

$$\mu_{ln} = \ln(\mu - 0,5 * \sigma^2) \quad (36)$$

Onde:

μ_{ln} é a média equivalente para distribuição normal.

μ é a média da resistência não drenada com distribuição teórica lognormal.

σ é o desvio padrão da resistência não drenada com distribuição teórica lognormal.

$$\sigma_{ln}^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu}\right) \quad (37)$$

Onde:

σ_{ln} é o desvio padrão equivalente para distribuição normal.

σ é o desvio padrão da resistência não drenada com distribuição teórica lognormal.

μ é a média da resistência não drenada com distribuição teórica lognormal.

Além da transformação dos dados, foi necessária a formatação dos dados em forma tabelar para entrada no programa Abaqus através da função *Field variable*. Essa habilitação possibilita a entrada de parâmetros de forma tabular, associando, por exemplo, o parâmetro de interesse a coordenadas x e y. Nesse caso, habilitam-se 2 *Field variables*, a primeira *Field variable* (FV1) associada à coordenada horizontal, e a segunda *Field variable* (FV2), à coordenada vertical. A Função *Field variable* também foi utilizada para introdução do fator de redução de resistência, criando-se assim uma FV3 que associa um fator de redução (FS=FV3) ao valor do parâmetro de interesse (S_u). Nesse sentido, a organização final do campo aleatório para fins de importação foi composta por três ou quatro colunas, parâmetro de interesse (S_u), FV1 (coordenada horizontal), FV2 (coordenada vertical) e FV3 (fator de redução) - quando calculado o fator de redução. O *script* de adequação

dos dados do campo aleatório para o Abaqus é apresentado no Apêndice B, e o Apêndice C identifica o *script* para consideração da redução dos fatores de resistência.

Ainda, com relação às *Field variables*, devem ser observados os seguintes procedimentos para vinculação: criação de sub-rotina USDFLD e ativação nas *keywords*. USDFLD é uma sigla utilizada pelo Abaqus que em inglês significa *user subroutine to redefine field variables at a material point*, ou em tradução livre, sub-rotina para redefinição de variáveis de campo em um ponto do material, e que deve ser escrita em linguagem de programação FORTRAN. Uma sub-rotina USDFLD foi utilizada para efetivar a associação de que a coordenada horizontal é a *Field variable 1* (FV1) e que a coordenada vertical é a *Field variable 2* (FV2). A sub-rotina pode ser observada no Apêndice D. A FV3, fator de redução, foi ativada através de *keywords*, indicando o passo de cálculo (*step*) de ativação e amplitude de valores, assim o *software* pode, além de utilizar os valores tabelados, realizar interações intermediárias de acordo com o incremento do passo de cálculo (*step*). Um esquema do local de modificação das *keywords* pode ser observado no Apêndice E, como sugerido por Su e Li (2012).

Paralelamente, uma macro foi gravada no Abaqus para originar o *script* em Python do modelo desenvolvido. Dentre as alterações necessárias no *script* originário da gravação, destacaram-se os seguintes: ciclo de repetições conforme número de simulações necessário, inserção do diretório onde constam os arquivos .csv com os campos de resistência não drenada, alteração do nome dos modelos para armazenamento dos arquivos, inserção de espera de completude de execução do modelo. Salienta-se também que de forma a acelerar o processo, sem a necessidade de visualização dos modelos em interface gráfica, os *scripts* foram executados diretamente em prompt de comando do Windows. O Apêndice F identifica, como exemplo, o *script* utilizado para o estudo de caso para simulação dos modelos no Abaqus.

Posterior ao cálculo dos modelos, deu-se início ao pós-processamento. Para isso, desenvolveram-se *scripts* em Python que fizessem a leitura dos arquivos gerados pelo Abaqus com extensões .odb e .sta. O primeiro tipo de extensão pode ser interpretado apenas pelo *software* (*script* indicado no Apêndice G) e indicou os três resultados seguintes, com apontamento da sigla utilizada pelo programa:

- A deformação (U), utilizada para ilustrar a superfície de ruptura do talude.
- A deformação plástica equivalente (PEEQ), também utilizada para ilustrar a superfície de ruptura do talude (DYSON; TOLOOIYAN, 2018).
- O fator de segurança, quando necessário.

Nos casos em que era preciso o conhecimento apenas da ruptura do talude, sem necessidade do cálculo do fator de redução, apenas os arquivos com extensão .sta eram utilizados para verificar a

completude da modelagem (Apêndice H). Caso o modelo não convergisse, indicava a ruptura do talude, visto que esse é o terceiro mecanismo de falha apontado por Dyson e Tolooiyan (2019) para determinar a falha do talude e o fator de redução correspondente:

1. Desenvolvimento de zonas plásticas formando uma superfície de deslizamento crítica.
2. Deformação considerável do talude.
3. Não convergência da solução de elementos finitos.

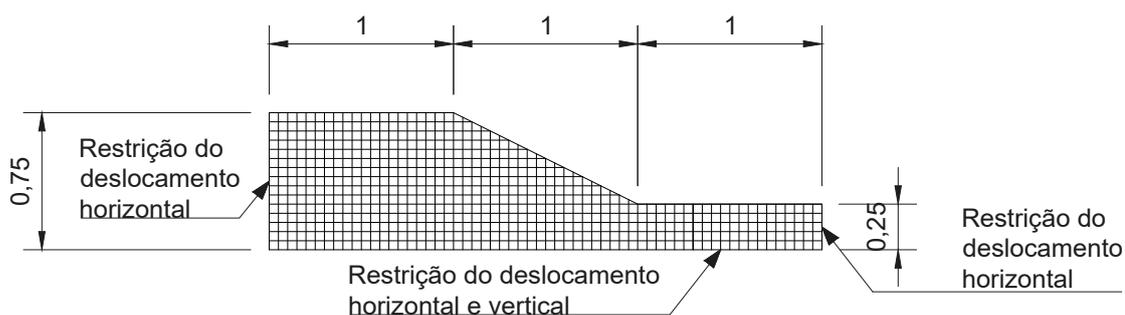
3.2 VERIFICAÇÃO

Este Capítulo foi seccionado baseado nas duas referências verificadas: Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017) e Liu *et al.* (2018). Em cada um dos subcapítulos, são apresentados os casos de estabilidade de taludes analisados e, em seguida, explicada a implementação pela autora, finalizando com as comparações de resultados.

3.2.1 Modelo de Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017)

Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017) realizaram uma análise probabilística de estabilidade de taludes utilizando o MEF, o MMC e, para a geração de campos estocásticos, o método LAS. O estudo foi realizado utilizando as rotinas RFEM de Fenton e Griffiths (2008), considerando um problema típico também conforme os mesmos autores. A Figura 17 identifica a geometria do talude adotada pelos autores, em que a inclinação é de 2:1. Além disso, também estão identificadas as condições de contorno: base fixa e apoios laterais deslizantes na direção vertical. Ademais, a malha é quadrática de lado 0,05 m. A discretização na direção horizontal é composta por 60 elementos (3 m) e na direção vertical mais extensa, por 15 elementos (0,75 m). No total, há 610 elementos planos de oito nós com a suposição de deformação plana.

Figura 17: Dimensões da seção utilizada pelos autores, medidas em metros.



Fonte: Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017).

Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017) adotaram o modelo elasto-plástico com critério de Mohr-Coulomb. A Tabela 10 identifica os valores de parâmetros determinísticos utilizados para ângulo de atrito, ângulo de dilatação e coeficiente de Poisson, respectivamente. Na sequência, a Tabela 11 apresenta os parâmetros estatísticos (média e desvio padrão) utilizados para a modelagem de resistência não drenada, módulo elástico e peso específico, parâmetros que foram variados simultaneamente, para os quais, os autores atribuíram uma distribuição teórica lognormal. Além disso, a distância de correlação é igual a 1m na direção horizontal e vertical para os três parâmetros do solo avaliados, a saber: resistência não drenada (S_u), módulo de Young (E) e peso específico (γ).

Tabela 10: Valores atribuídos a parâmetros para seção da literatura.

Parâmetro	Valor
ϕ	0°
ψ	0°
ν	0

Fonte: Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017).

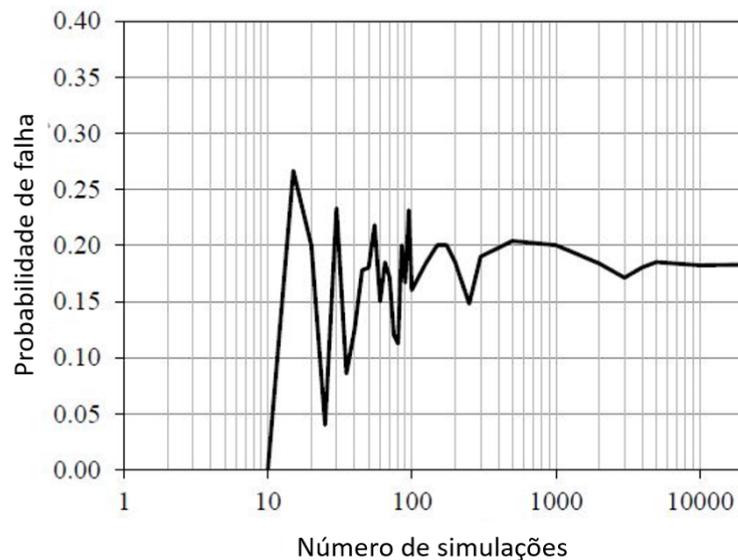
Tabela 11: Parâmetros estatísticos de campo aleatórios lognormais.

Parâmetro	Média	Desvio padrão
S_u	2 kPa	0,5 kPa
E	100.000 kPa	50.000 kPa
γ	20 kN/m ³	2 kN/m ³

Fonte: Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017).

Os autores quantificaram a probabilidade de falha e sugerem, a partir dos estudos realizados, a utilização de pelo menos 4.000 iterações a fim de obter resultados estáveis e confiáveis, em que ao total foram avaliadas 20.000 simulações. Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017) demonstram, por meio da Figura 18, que a probabilidade de falha para o talude estudado é em torno de 0,18, uma vez que há uma estabilização do gráfico em torno desse valor.

Figura 18: Convergência da probabilidade de falha do talude da literatura.



Adaptado de: Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017).

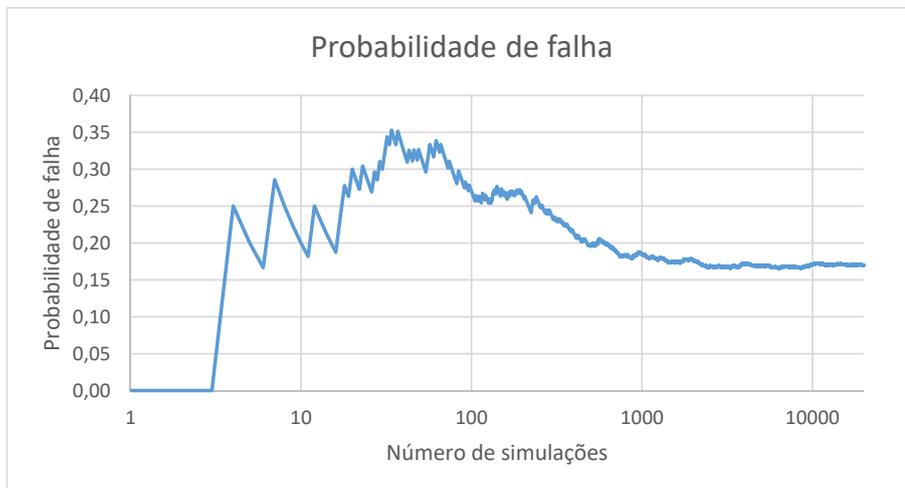
Destacam-se nas conclusões dos autores três pontos. Inicialmente, há uma ênfase na influência na quantidade de simulações, visto que afirmam que quanto maior esse número, maior a confiabilidade dos resultados obtidos, enquanto ponderam que isso também está associado a um aumento no tempo computacional, o que se torna impeditivo em alguns casos, principalmente quando são utilizados computadores pessoais. Na sequência, destacam a importância de a análise estocástica apontar uma probabilidade de falha de 18% mesmo que a análise determinística de fator de segurança tenha apontado um fator de segurança de 1,30. Por fim, os autores concluem que a parte mais complexa corresponde ao procedimento LAS para a geração do campo estocástico da variável aleatória de interesse, e a consideram numericamente robusta. Realizada a apresentação do caso da literatura, foram efetuadas as implementações.

Utilizando o modelo de Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017), foram realizadas duas verificações:

- (A) Análise considerando o modelo igual como apresentado com a utilização *software* RFEM.
- (B) Análise considerando uma versão adaptada, comparando resultados entre dois *softwares*: RFEM e implementação utilizando Abaqus.

Observando a proposta A, inicialmente foi modelada a mesma seção com os mesmos parâmetros no mesmo programa RFEM. Para o fator de segurança, obteve-se um valor de 1,3, mesmo resultado publicado pelos autores. E, para a probabilidade de falha, atingiu-se um resultado próximo aos 18% do artigo, 17,0%, em que foram simuladas 20.000 seções, assim como foi apresentado e como pode ser observado na Figura 19, a qual é apresentada em escala logarítmica.

Figura 19: Convergência da probabilidade de falha do talude da literatura para comparação.



Executada essa primeira verificação, avançou-se para a implementação do modelo em uma versão adaptada e simplificada, envolvidas três modificações:

1. A implementação de campo aleatório apenas para o parâmetro de resistência não drenada.
2. O emprego do *software* de elementos finitos Abaqus.
3. A simulação de apenas 4.000 seções.

A Tabela 12 identifica os valores determinísticos atribuídos aos parâmetros no caso particular. Destaca-se que o módulo elástico e o peso específico foram estabelecidos com comportamento determinísticos, e os valores adotados correspondem às médias. Além disso, como citado anteriormente, apenas para a resistência não drenada foi implementado o campo aleatório e manteve-se seu comportamento conforme a função densidade de probabilidade lognormal, com os parâmetros estatísticos identificados pela Tabela 13.

Tabela 12: Valores atribuídos a parâmetros da versão adaptada.

Parâmetro	Valor
ϕ	0°
ψ	0°
ν	0
E	100.000 kPa
γ	20 kN/m ³

Tabela 13: Parâmetros estatísticos atribuídos à resistência não drenada.

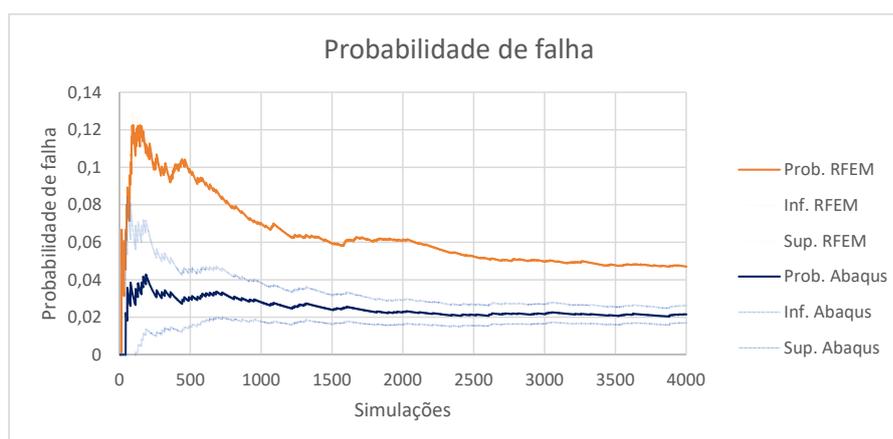
Parâmetro	Valor
Média	2 kPa
Desvio padrão	0,5 kPa

Este caso particular foi modelado no programa RFEM para geração de campos aleatórios pelo método LAS e cálculo da probabilidade de falha. Os campos gerados foram também implementados no *software* Abaqus, o que permitiu um comparativo direto entre resultados obtidos pelos diferentes *softwares* e consequente verificação da implementação dos campos aleatórios no *software* Abaqus.

A Figura 20 identifica o resultado da probabilidade de falha utilizando os programas RFEM e Abaqus. No primeiro caso, há estabilidade dos valores a uma probabilidade de 4,70%. Por sua vez, no segundo caso a, convergência de probabilidades ocorreu em 2,20%, que foram obtidas quando o modelo não convergia no Abaqus.

Destaca-se que até aproximadamente a simulação 2.000 da Figura 20, cujo resultado foi alcançando utilizando Fenton e Griffiths (2008), a probabilidade de falha variava acima de 6%, atingindo como máximo 12%. No caso dos resultados da modelagem implementada no Abaqus, a variação de probabilidades foi menor atingindo o máximo de pouco mais de 4% e se estabilizando próximo de 2% a partir da simulação 2.000.

Figura 20: Verificação da convergência de probabilidade de falha nos dois programas.



A Figura 20 também apresenta as curvas com o intervalo de confiança de 95% para os resultados. Esse intervalo é obtido a partir da inequação 38, em que sua primeira parte define o limite inferior e a segunda, o limite superior. Essa metodologia de intervalo de confiança pode ser visto no trabalho de Melchers e Beck (2018).

$$\hat{P}_f - k * \sigma_{\hat{P}_f} \leq P_f \leq \hat{P}_f + k * \sigma_{\hat{P}_f} \quad (38)$$

Onde:

P_f é a probabilidade de falha.

\hat{P}_f é uma aproximação da probabilidade de falha.

k é a constante que define a magnitude do intervalo de confiança. Para um intervalo de 95%, $k = 1,96$.

$\sigma_{\hat{P}_f}$ é o desvio padrão da aproximação da probabilidade de falha e pode ser calculado conforme a Equação 39.

$$\sigma_{\hat{P}_f} = \sqrt{\frac{P_f(1 - P_f)}{n}} \quad (39)$$

Onde:

P_f é a probabilidade de falha

n é o tamanho da amostra

Nota-se que não há sobreposição dos intervalos de confiança utilizando os programas Abaqus e RFEM. O intervalo obtido pelo programa Abaqus apresenta uma amplitude maior possivelmente devido a um efeito de escala, pois sua probabilidade é menor do que a probabilidade obtida por meio da análise realizada pelo RFEM.

Além desse resultado, foi possível observar cunhas de ruptura similares nos dois programas. A Figura 21 e a Figura 22 exemplificam o caso de um modelo implementado a partir de um mesmo campo aleatório, a primeira ilustra a cunha no programa Abaqus, e a segunda, no programa RFEM. Nota-se que as superfícies são similares.

Figura 21: Superfície de ruptura de talude modelada no Abaqus.

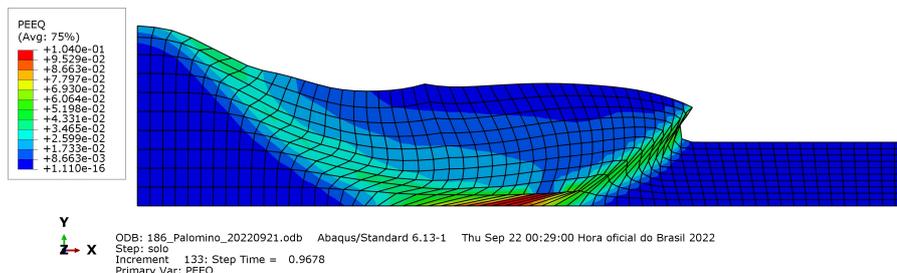
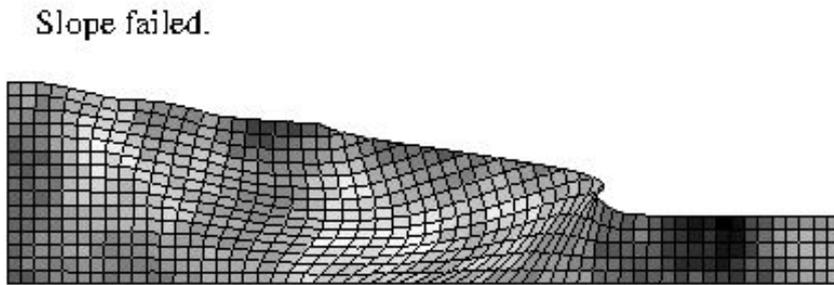


Figura 22: Superfície de ruptura de talude modelada no RFEM.



Resumidamente, a Tabela 14 apresenta a comparação dos resultados de probabilidade de falha nas duas análises realizadas. A primeira verificação consiste na implementação de um modelo igual ao do artigo de Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017), e a segunda, considerando a comparação entre os dois programas. Como os valores são similares, levou-se em conta que a metodologia foi implementada de forma adequada.

Tabela 14: Comparação de resultados de probabilidades de falha.

1ª Verificação	2ª Verificação
0,18 (RFEM)	0,047 (RFEM)
0,17 (RFEM)	0,022 (Abaqus)

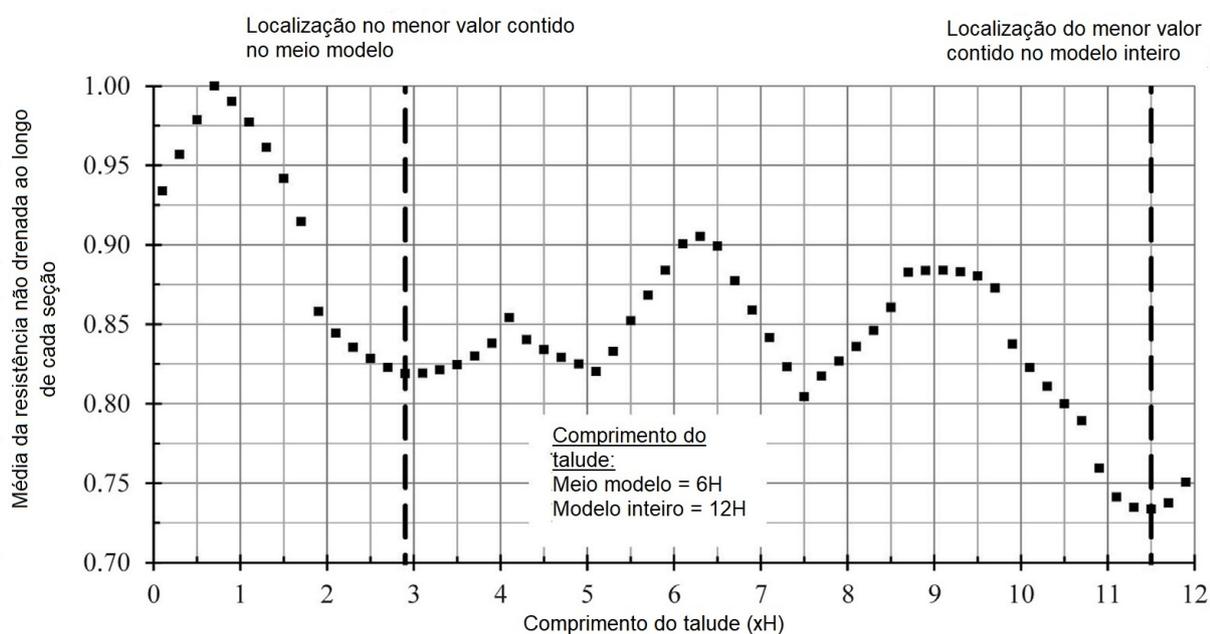
3.2.2 Modelo de Liu *et al.* (2018)

O artigo de Liu *et al.* (2018) comparou resultados de estabilidade de taludes de análises bidimensionais com tridimensionais. Os autores apontam que a análise de elementos finitos 3D com emprego de campos aleatórios reflete adequadamente a variabilidade espacial das propriedades do solo, porém frequentemente demanda mais tempo do que a análise 2D. Esse tempo é drasticamente ampliado quando realizada análise probabilística e implementação de metodologias de identificação de fatores de segurança como o SRF. Por esse motivo, na pesquisa, os autores consideraram a análise da seção transversal 2D menos vantajosa (ou mais pessimista) do modelo 3D estudado. Esse conceito de “mais pessimista” refere-se à seção transversal com menor média de valores de resistência ao cisalhamento não drenada. A seleção da seção mais pessimista é obtida a partir da geração de um campo aleatório tridimensional da resistência ao cisalhamento não drenada com cálculo da média de S_u .

Além da comparação dos resultados do modelo 2D com o modelo 3D, os autores ainda formularam uma segunda análise comparativa. Como a resistência ao cisalhamento não drenada varia espacialmente de elemento para elemento, é provável que a seção mais pessimista varie de acordo

com a variação do comprimento adotado para o talude. Para levar em conta o efeito do comprimento do talude, foi realizada análise considerando-se um chamado talude pleno (tamanho total) com comprimento de $12H$, sendo H a altura/espessura do material de fundação (ver Figura 24); e uma segunda análise com comprimento de $6H$, considerado meio talude. Em todos os casos, H adotado foi igual a 5m . De forma a exemplificar e, levando em conta a análise para meio talude, a seção mais pessimista está localizada em um comprimento $2,9H$, como demonstrado na Figura 23. Por sua vez, a seção mais pessimista para o modelo pleno está demonstrada na mesma Figura 23 na seção com $11,5H$.

Figura 23: Média da resistência não drenada em cada seção transversal em função do comprimento do talude.



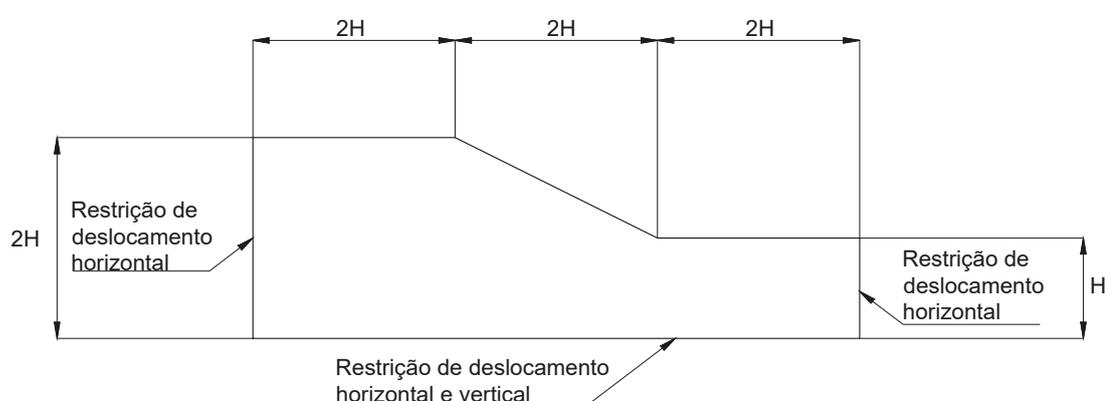
Adaptado de: Liu *et al.* (2018).

Em suma, os autores analisaram quatro modelos:

1. "Modelo 3D inteiro": talude 3D com comprimento igual a 60m .
2. "Modelo 2D inteiro": modelo 2D com deformação plana baseado na seção mais pessimista com base em um modelo 3D de comprimento igual a 60m .
3. "Modelo 3D meio": talude 3D com comprimento igual a 30m .
4. "Modelo 2D meio": modelo 2D com deformação plana baseado na seção mais pessimista de um talude 3D com comprimento igual a 30m .

Para geração de campos aleatórios, os autores utilizaram o método RFEM de Fenton e Griffiths (2008). No entanto, o cálculo numérico foi realizado pelos autores por meio da implementação no *software* Abaqus, com 600 simulações de cada modelo. O solo foi modelado como um material elástico, perfeitamente plástico de acordo com o critério de plastificação de Mohr-Coulomb sob condições não drenadas. A Figura 24 ilustra a geometria da seção transversal bidimensional com as condições de contorno utilizadas pelos autores nos modelos 2D. A malha em elementos finitos não foi indicada, porque foi selecionada como "livre", apesar de quadrática.

Figura 24: Geometria do modelo numérico e condição de contorno.



Adaptado de: Liu *et al.* (2018).

Os valores determinísticos atribuídos aos parâmetros utilizados na modelagem numérica são apresentados na Tabela 15. Na sequência, na Tabela 16, constam os parâmetros estatísticos utilizados para a geração de campo aleatório por meio da metodologia LAS. Dessa forma, a variação na resistência ao cisalhamento não drenada foi representada por um campo aleatório com distribuição lognormal com uma função de autocorrelação exponencial quadrada.

Tabela 15: Valores atribuídos aos parâmetros da seção.

Parâmetro	Valor
ϕ	0°
S_u	variável
ψ	0
E	100.000kPa
ν	0,49
γ	18kN/m ³

Fonte: Liu *et al.* (2018).

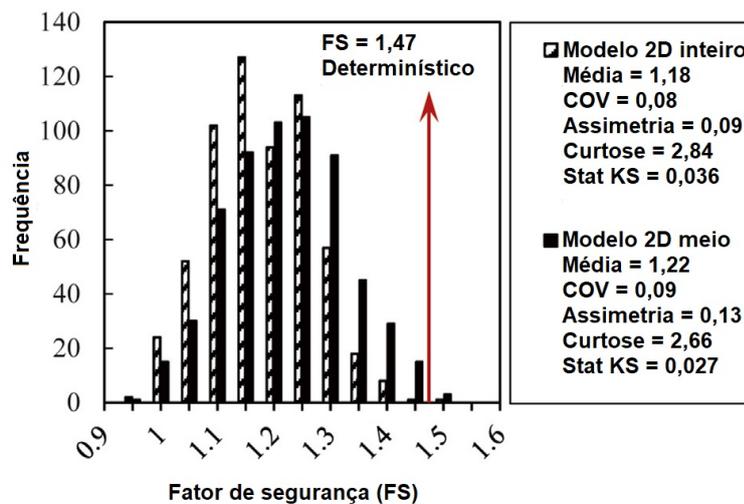
Tabela 16: Valores estatísticos atribuídos à resistência não drenada.

Parâmetro	Valor
Média	22,5 kPa
Desvio padrão	6,75 kPa
Escala de flutuação horizontal	10 m
Escala de flutuação vertical	2 m

Fonte: Liu *et al.* (2018).

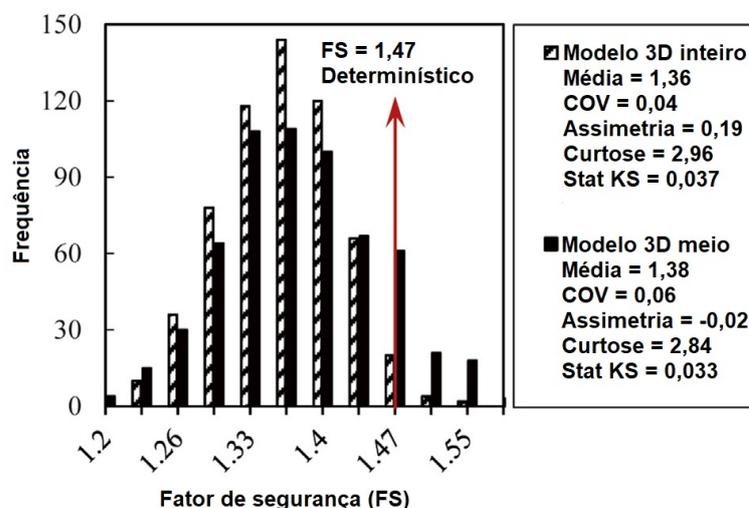
Diferentemente da análise de modelo de Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017), foi verificado FS da estrutura por meio da redução dos parâmetros de resistência (SRF), procedimento implementado no *software* Abaqus. Liu *et al.* (2018) efetuaram 600 simulações para cada um dos quatro modelos citados anteriormente, calculando um FS para cada campo aleatório. A partir dos FS, os autores desenvolveram histogramas, como pode ser observado na Figura 25 e na Figura 26, que identificam os resultados obtidos para o modelo 2D e 3D, respectivamente.

Figura 25: Histograma de ocorrência de FS para modelo 2D.



Adaptado de: Liu *et al.* (2018).

Figura 26: Histograma de ocorrência de FS para modelo 3D.



Adaptado de: Liu *et al.* (2018).

Com base nos dados apresentados na Figura 25, verifica-se que os modelos 2D resultam em FS médios de 1,18 para o modelo inteiro (largura de 60m) e FS médio de 1,22 para o meio modelo (largura de 30m), valores consideravelmente inferiores ao valor determinístico de 1,47. Avaliando os resultados dispostos na Figura 26, verifica-se que as análises 3D resultaram em valores de FS médios de 1,36 (largura plena) e 1,38 (meia largura), valores mais próximos e ao mesmo tempo inferiores ao valor determinístico.

Os autores justificam que as análises probabilísticas de campos aleatórios 3D seriam as simulações ideais, por representarem de forma mais fiel o comportamento de campo e uma possível região de fraqueza não somente condicionada ao plano transversal. Nesse sentido, análises 3D de campos aleatórios poderiam resultar em valores inferiores para FS, se comparadas a análises considerando o meio modelo com propriedades homogêneas. Por sua vez, o resultado inferior atribuído à seção 2D deve-se ao fato de esta adotar as chamadas seções mais pessimistas, de menor valor médio de S_u . Resumindo-se, o embasamento da discussão e proposta dos autores é que o campo deve ser modelado tridimensionalmente, ou que sejam adotadas seções mais pessimistas para uma análise 2D mais assertiva.

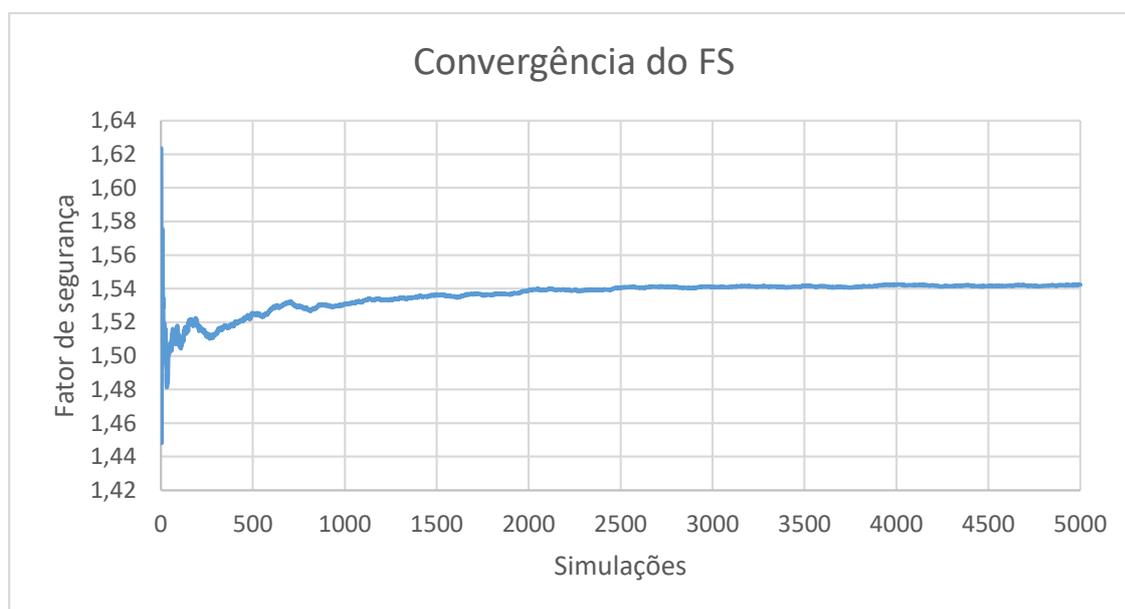
Feita a introdução da pesquisa dos autores objetivando o subsídio para a compreensão das análises realizadas, inicia-se a explicação das considerações adotadas no presente trabalho. Assim como em Liu *et al.* (2018), foi utilizada a metodologia LAS para geração de campos aleatórios e o *software* Abaqus para modelagem em elementos finitos.

Na presente análise, foi implementado apenas o modelo bidimensional ilustrado pela Figura 24 com os parâmetros especificados na Tabela 15 e com geração de um campo aleatório utilizando os parâmetros estatísticos apontados na Tabela 16.

Inicialmente, consideraram-se insuficientes as 600 simulações realizadas por Liu *et al.* (2018), então optou-se por utilizar um número similar ao apresentado por Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017) e foram adotados 5.000 como objetivo, e frequentemente na bibliografia são utilizadas mais de 1.000 simulações (WANG *et al.*, 2020; GRIFFITHS; HUANG; FENTON, 2009). Liu *et al.* (2018) apresentam ao final do artigo uma relação com os tempos de processamento de cada um dos quatro modelos identificados anteriormente. De certa forma, justificam a quantidade reduzida de iterações realizadas devido às 11h necessárias para cada simulação de um modelo 3D, por exemplo. Outra observação a ser feita é que não foi apresentada a estabilização dos resultados obtidos para o FS com as 600 simulações, o que também contribui para a identificação de sua insuficiência numérica.

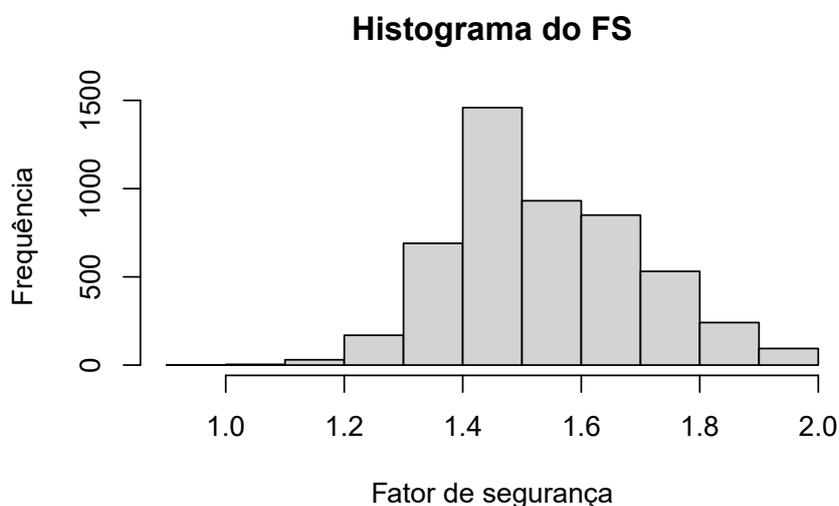
Adotando 5.000 simulações no presente trabalho, verificou-se a estabilização de FS médio de 1,54 como demonstrado na Figura 27, em que esse valor foi atingido na simulação 2.500. Ademais, observa-se também que até a simulação de número 500, o FS apresenta variação significativa, o que demonstra necessidade de simulações além das apresentadas pelos autores.

Figura 27: Estabilização do fator de segurança com o número de simulações.



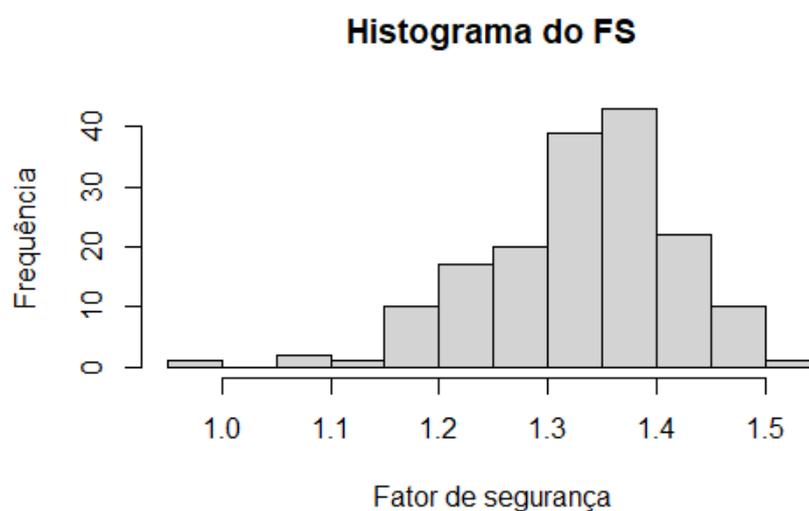
A Figura 28 apresenta o histograma dos fatores de segurança obtidos para as 5.000 simulações objetivando a melhor visualização do intervalo de dados, em que os valores variam de 0,96 a 2,00 e a maior ocorrência de valores acontece entre 1,40 e 1,50.

Figura 28: Histograma de resultado de FS para 5.000 simulações.



A fim de comparar a análise realizada com o resultado apresentado pelos autores, a partir das 5.000 simulações, foram filtradas as 166 simulações que continham as menores médias de campo de resistência não drenada. Isso foi feito como forma de aproximação ao que Liu *et al.* (2018) chamaram de seções "mais pessimistas". O número 166 foi consequência de uma estimativa de seções transversais contidas no "modelo 3D meio" utilizado pelos autores. O comprimento do "modelo 3D meio" é de 30m, como cada elemento possui 1m na direção do comprimento, então é possível estimar que há 30 seções transversais a cada modelagem tridimensional (1/30 ou 0,033%). Uma vez que foram implementadas 5.000 simulações, se consideradas como seções transversais de um modelo 3D equivalente, pode-se chegar a 166 simulações mais pessimistas (que representam 0,033%). Com base nessa seleção de menores médias e levando em conta seus fatores de segurança, foi gerado o histograma da Figura 29. Nela, é possível observar que o FS varia de 0,96 a aproximadamente 1,51, e a maior ocorrência de valores acontece entre 1,35 e 1,40, com média de 1,33.

Figura 29: Histograma de resultado de FS selecionando 166 simulações.



O resultado encontrado através da seleção de seções mais pessimistas na Figura 29 ajusta-se entre os dois cenários ilustrados por Liu *et al.* (2018) na Figura 25 e na Figura 26. Quando comparado com o modelo 2D, exibe uma média superior, pois não foi realizada a mesma modelagem que os autores consideraram como 2D. Ao mesmo tempo, também pode ser comparada com o modelo 3D, pois o menor fator de segurança encontrado por Liu *et al.* (2018) em um modelo tridimensional relaciona-se de forma direta à seção mais pessimista desse modelo.

Uma segunda análise que pôde ser feita é a comparação da probabilidade de falha obtida por meio da modelagem numérica no Abaqus com aquela obtida pelo RFEM, uma vez que esse dado não foi apresentado por Liu *et al.* (2018), então foi realizada essa análise complementar. Pelo RFEM foi encontrada uma probabilidade de falha de 0,58% e, por sua vez, pelo Abaqus obteve-se uma probabilidade de 0,02%. Assim como visto nos resultados alcançados a partir do modelo de Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017), a probabilidade obtida por meio do programa Abaqus apresentou um valor menos conservador do que o apresentado pelo programa RFEM.

Por fim, registra-se também um exemplo da superfície de deslocamento evidenciada nos dois softwares citados anteriormente. Comparam-se, para um mesmo campo aleatório, as similares superfícies formadas, com a mesma configuração de cunha de ruptura para fator de redução de 0,96. Na Figura 30, observa-se a cunha de ruptura formada a partir do programa Abaqus e, por sua vez, a Figura 31 identifica a superfície gerada pelo programa RFEM.

Figura 30: Superfície de ruptura de talude modelada no Abaqus.

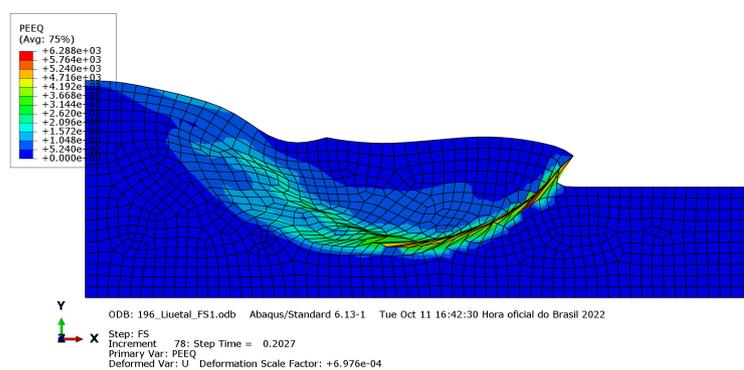
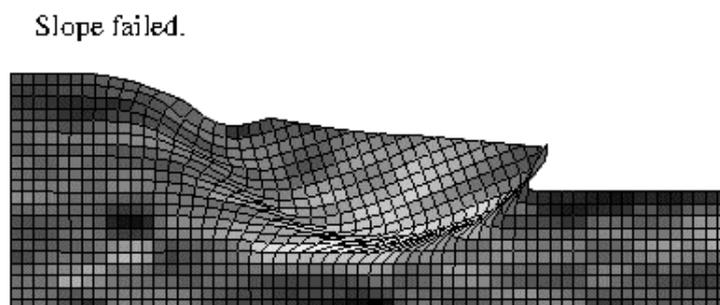


Figura 31: Superfície de ruptura de talude modelada no RFEM.



3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção, são realizadas observações gerais da implementação e dos resultados apresentados. Como apontado no referencial teórico (seção 2.5) e observado no presente capítulo, é possível implementar campos aleatórios no programa de elementos finitos Abaqus. A implementação da metodologia foi verificada em dois casos da literatura para, na sequência, ser aplicada ao estudo de caso.

Inicialmente, aponta-se que há diferenças nos critérios de ruptura entre os *softwares* de modelagem numérica RFEM e Abaqus. Para o primeiro programa, havia opção de estabelecimento de tolerância de convergência e número máximo de simulações. Por sua vez, no caso do Abaqus, havia critérios de tolerância para deformações na ordem de 10^{-8} , entre outros critérios preestabelecidos. E mesmo que considerando esses critérios e buscando respostas mais aproximadas, ainda assim não se apresentaram idênticas. Portanto, há diferenças inerentes aos *softwares*, por exemplo, diferentes elementos finitos, diferentes funções de interpolação e estrutura de resolução interna.

Outro ponto a ser destacado é o alinhamento com Liu *et al.* (2018) quando os autores apontam os longos períodos que as simulações demandam. Na presente pesquisa, o modelo de Palomino-Tamayo,

Awruch e Rodríguez-Calderón (2017) levou em média 2min a cada simulação no Abaqus, e Liu *et al.* (2018) demandaram em média 6min a cada simulação. Como foi realizada uma análise probabilística, foi necessário um número considerável de simulações para obtenção de uma probabilidade. A Tabela 17 apresenta o tempo total necessário, porém esse tempo foi menor devido à utilização de simulações paralelas, incluindo a utilização de mais de um computador. Mesmo assim, demandou-se demasiado tempo para as execuções, além dos testes realizados anteriores aos resultados apresentados.

Tabela 17: Tempos totais de processamento da modelagem numérica para modelos da literatura.

Modelo	Tempo/simulação	Nº simulações	Tempo total
Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017)	2min	4.000	133h
Liu <i>et al.</i> (2018)	6min	5.000	500h

Ainda com relação à comparação de Liu *et al.* (2018), a discrepância dos fatores de segurança deu-se principalmente pela diferença na implementação do problema. Os programas utilizados pelos autores foram os mesmos utilizados para comparação, no entanto o modelo adotado não foi o tridimensional, mas bidimensional. Houve a tentativa de aproximação da seleção de seções transversais mais pessimistas, mas ainda assim os resultados finais foram discrepantes. Vale destacar que o intuito do trabalho de Liu *et al.* (2018) foi comparar modelos 3D e 2D com considerações de seções mais pessimistas, porém não foi apresentada estabilização dos valores de FS apresentados.

Apesar das observações, considerou-se que a implementação encontra-se adequada, pois os resultados apresentam a mesma ordem de grandeza quando comparados com os resultados da bibliografia. Dessa forma, prosseguiu-se para o estudo de caso, no qual foi aplicada a metodologia aqui desenvolvida.

4 ESTUDO DE CASO: ATERRO SOBRE SOLOS MOLES BR-470, km 30+220

O presente capítulo apresenta o resultado da aplicação de campos aleatórios para caracterização da probabilidade de falha de um aterro sobre solos moles: estudo de caso BR-470, seção do km 30+220. A estrutura desta seção é composta por quatro partes. Inicialmente, é evidenciada a caracterização básica e geotécnica da área de estudo. Posteriormente, expõe-se a quantificação estatística de parâmetros geotécnicos da região, a identificação das funções teóricas de aderência, escala de flutuação, que são dados utilizados para a geração de campos aleatórios. Em seguida, é apresentado o modelo geomecânico utilizado para modelagem em elementos finitos. E, por fim, são apresentados e discutidos os resultados.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

No presente trabalho, apresenta-se a quantificação da probabilidade de falha de uma seção transversal de um aterro construído para duplicação da BR-470, em Santa Catarina. Visando auxiliar a caracterização da seção de estudo, inicialmente é demonstrada de forma geral uma visão sobre a obra de duplicação e perfis geotécnicos característicos da região.

O trecho de duplicação da BR-470 compreende a ligação entre os municípios de Gaspar e Navegantes, região caracterizada como Depósito 4 por Grandó (2018). A rodovia está em processo de duplicação de aproximadamente 73km, divididos em quatro lotes. A obra justifica-se pelo alto tráfego na região, tanto de veículos de passeio quanto de veículos de carga. A previsão de término desses trechos é entre agosto e dezembro de 2022 (DNIT, 2022). Na Figura 32 apresentam-se os trechos denominados 6, 7, 8 e 9 que referenciam os lotes 1, 2, 3, 4 da obra da Rodovia BR-470.

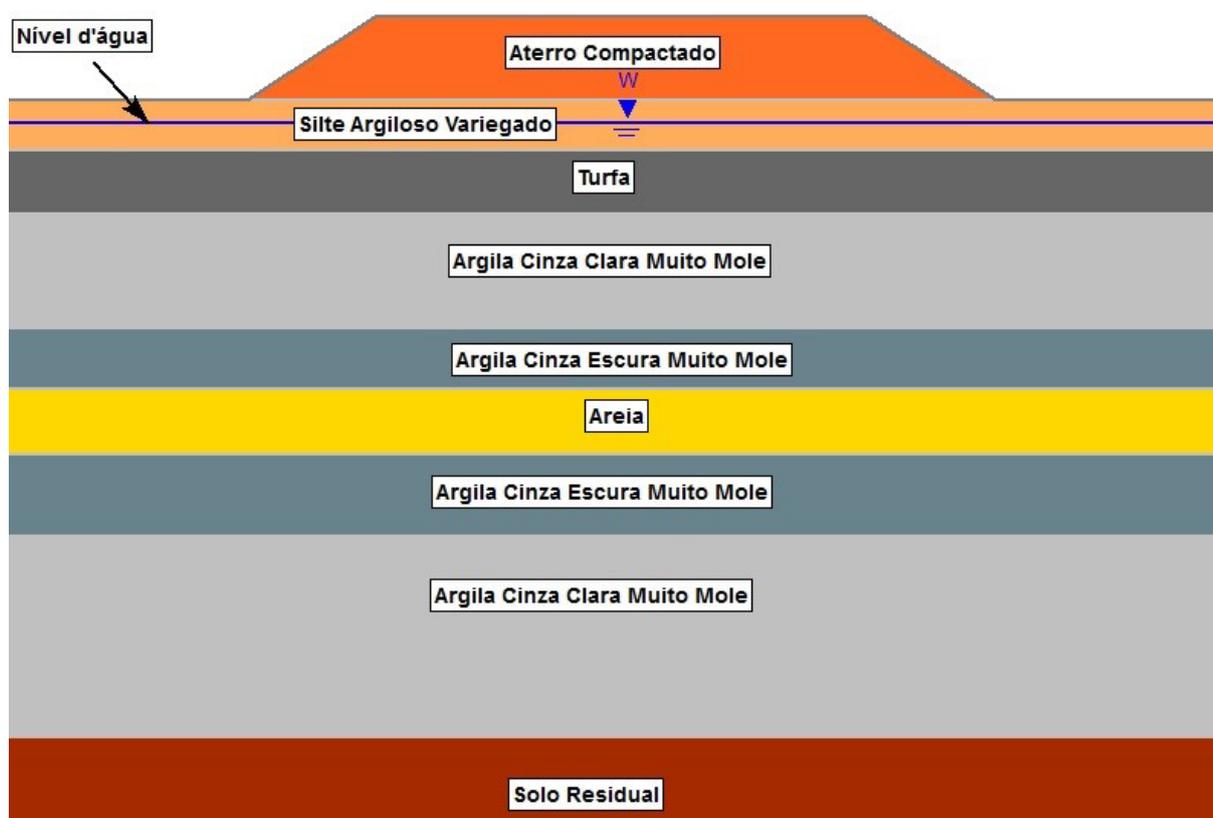
Figura 32: Localização da área de estudo.



Fonte: DNIT (2022)

No lote 2, indicado na Figura 32 pelo número 7, está localizado o km 30+220, estudado na presente pesquisa. A área também é objeto de estudo de Grandó (2018) e Cordeiro (2019), autores que cederam os dados para que esta pesquisa fosse realizada. De acordo com Cordeiro (2019), é uma região com depósitos de argila mole, compostos por camadas de turfa, argila cinza com ou sem matéria orgânica, intercaladas algumas vezes por camadas ou lentes de areia. Um perfil característico com camadas de argila com espessuras médias de 3m, 2m e 1,5m pode ser observado na Figura 33.

Figura 33: Perfil característico.



Fonte: Cordeiro (2019).

Segundo Cordeiro (2019), foram realizados ensaios tanto de campo quanto de laboratório no formato de ilhas de investigação, contemplando sondagens SPT (do inglês, *Standard Penetration Test*), determinação da umidade natural de camadas moles, CPTu, ensaio de dissipação, de palheta, ensaio de adensamento e triaxiais não drenados e não consolidados UU (do inglês, *Unconsolidated and Undrained*).

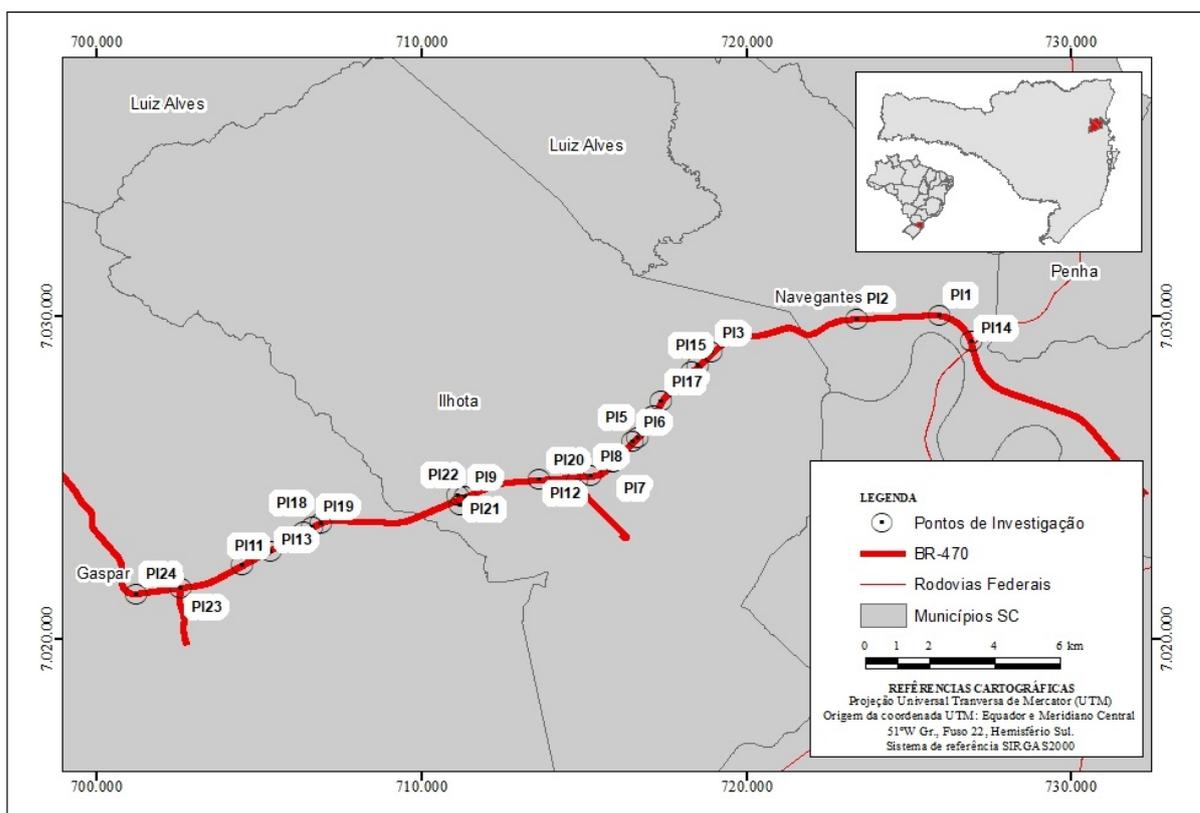
Foram disponibilizados desse trecho 6 e 7 (ou lotes 1 e 2) os seguintes resultados:

- 34 ensaios de palheta.
- 31 ensaios triaxiais UU.

- 50 ensaios de dissipação.
- 24 ensaios CPTu.
- 19 ensaios de adensamento.

Os ensaios CPTu foram os utilizados como básicos na presente pesquisa por apresentarem perfis contínuos de investigação em profundidade. Os demais ensaios foram utilizados como balizadores das informações. Um mapa com a localização dos pontos de investigação dos ensaios piezocones é apresentado na Figura 34. Dados adicionais que contribuem para caracterizar de forma geral a área de estudo constam no Apêndice A, em que são apresentadas características gerais das propriedades do solo obtidas por meio de ensaio CPTu.

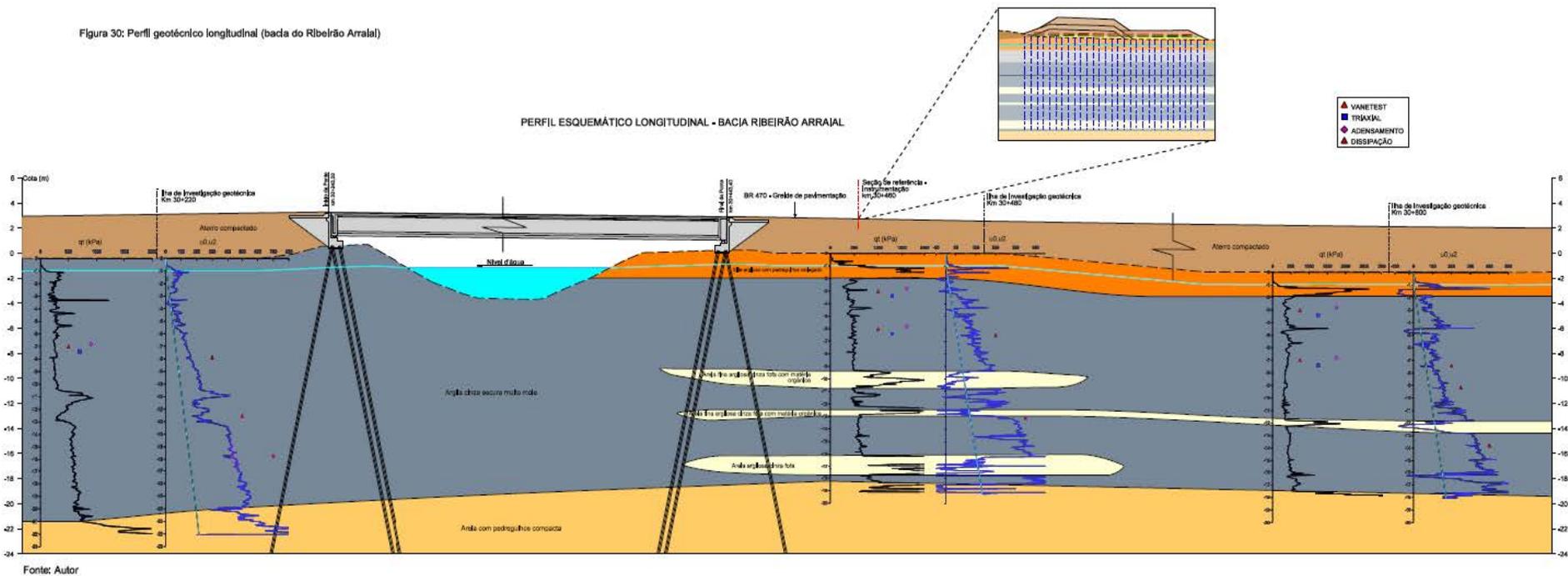
Figura 34: Localização dos pontos de sondagem CPTu da área de estudo.



Cordeiro (2019), em sua avaliação de comportamento de aterro executado sobre solo mole, analisou e interpretou os resultados das investigações geotécnicas executadas na ilha de investigação localizada na estaca do km 30+480, identificado pelo PI19 da Figura 34. De forma complementar, também avaliou duas ilhas de investigação adjacentes: a ilha da estaca do km 30+220 (cabeceira leste da ponte sobre o Ribeirão Arraial) e um ponto mais afastado, no km 30+800. Esses pontos estão representados em um perfil longitudinal na Figura 35.

No perfil apresentado na Figura 35, extraído de Cordeiro (2019), pode-se identificar a divisão das camadas de solo, o greide de pavimentação, os perfis de resistência real mobilizada (q_t) e a poropressão (u_2), pontos com ensaios realizados, como o ensaio de palheta (*vanetest*), triaxial, adensamento e dissipação. Verifica-se a predominância de camadas argilosas com q_t de 0 a 1.300 kPa, e du de -24 a 499. Nas ilhas km 30+480 e km 30+800, são visualizadas também camadas arenosas com q_t de 20.000 kPa e espessuras de aproximadamente 1m ou 2m intercaladas no perfil argiloso. Nesses pontos também é possível visualizar um material siltoso nas profundidades iniciais das sondagens. Por sua vez, o perfil do km 30+220 caracteriza-se como mais argiloso, sem intercalação de camadas arenosas, sendo que esse perfil será utilizado como referência na presente pesquisa e descrito com maior detalhamento no decorrer do texto.

Figura 35: Perfil longitudinal de três ilhas de investigação analisadas por Cordeiro (2019).



Fonte: Cordeiro (2019).

Seção km 30+220

O resultado do ensaio CPTu do km 30+220 pode ser observado na Figura 36, em que há um conjunto de cinco gráficos. A Figura 36a apresenta o resultado de resistência real mobilizada (q_t), a Figura 36b identifica a poropressão (u_2) e a pressão hidrostática (u_0), a Figura 36c mostra o parâmetro de poropressão (B_q), a Figura 36d, a razão de atrito (R_f) e, por fim, a Figura 36e identifica o comportamento do material pelo índice I_{crw} . Nos ensaios, uma leitura foi realizada a cada 0,02m e o nível de água foi identificado na mesma profundidade do pré-furo, a 0,5m.

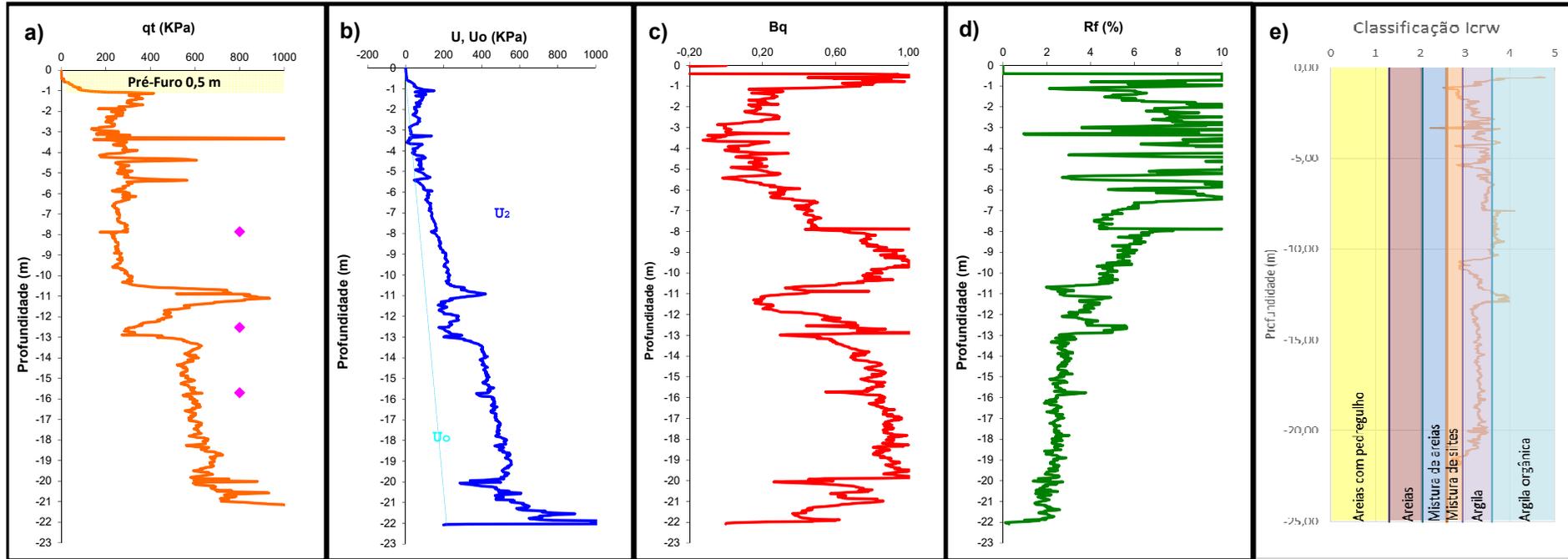
No perfil pode-se visualizar q_t variando entre 200kPa e 400kPa a partir da profundidade do pré-furo até aproximadamente 10m. Em seguida, há uma tendência de aumento da resistência até a finalização das leituras, com ocorrência de alguns picos. O gráfico da Figura 36b identifica uma tendência de aumento de u_2 com a profundidade, atingindo um máximo de 1.084kPa, e essa tendência ocorre devido ao aumento da pressão hidrostática, reta que também é identificada na Figura 36b.

A Figura 36c identifica a variação do parâmetro da poropressão, B_q , que varia de $-0,20$ a $1,73$, em que, até a profundidade de 8m, a variação fica menor que 0,6 e, em seguida, há uma tendência de aumento, chegando a valores próximos de 1. O gráfico de R_f da Figura 36d apresenta valores acima de 4% até a profundidade de 8m e, na sequência, há tendência de queda se mantendo próximo de 2%.

Os parâmetros de q_t baixo (com o máximo de 1.900kPa) e R_f alto indicam a presença de solos mais argilosos. Além disso, com os baixos valores de q_t e a geração de poropressão (B_q de aproximadamente 1), há também indícios de se caracterizar um solo argiloso. Para confirmação desse indicativo, o comportamento do solo foi verificado pelo índice I_{crw} .

A partir dos parâmetros de q_t e f_s , foi possível classificar o comportamento do material por meio da metodologia que utiliza ábacos, I_{cRW} , demonstrada na seção 2.1.1 resultando na classificação conforme o índice e a profundidade ilustrados pela Figura 36e. Com base nela, é possível observar que há variações entre mistura de areias e argila orgânica ao longo da profundidade, mas a classificação predominante corresponde ao material argiloso. Essa informação está em concordância com o que foi discutido anteriormente, além de condizer também com a ilustração das camadas de solo apresentada por Cordeiro (2019) na Figura 35.

Figura 36: Perfil de investigação de CPTu km 30+220: a) resistência real mobilizada (q_t); b) u_2 e u_0 ; c) B_q ; d) razão de atrito (R_f); e) comportamento do material pelo índice **BOLETIM DE ENSAIO C.P.T.U. - Conforme NBR 12069/MB-3406**



63

Cliente:	PROSUL - PROJETOS, SUPERVISÃO E PLANEJAMENTO	Data:	10/08/12	Responsável Técnico:	
Obra:	Duplicação Rodovia BR 470/SC	Estaca:	E: 706.882,3; N: 7.023.594,1		
Local:	BR 470 - KM 30+220 (Ponte Arraial)	Furo:	PC 06	Eng. Edgar Odebrecht - CREA SC 30.913-4	
Nº Relatório:	CPTU 190-07/12	Cota (m):	7,36	Na (m):	-0,50 ◆ Dissipação

Coordenadas e cotas fornecidas pelo cliente.



Observando que o parâmetro S_u , será utilizado nas análises de estabilidade a curto prazo, a Figura 37 apresenta a estimativa do valor em profundidade (Figura 37a), a análise da relação S_u/σ'_{v0} (Figura 37b) e os perfis estimados de OCR (Figura 37c e a Figura 37d). A Figura 37a, que demonstra o perfil de S_u com a profundidade, foi obtida através da análise de N_{kt} , de ensaio de palheta executado próximo ao perfil, e N_{kt} s da região (descritos em Cordeiro (2019)). A Figura 37c e Figura 37d são apresentadas visando identificar a consistência do perfil de S_u , uma vez que, se caracterizado o material como normalmente adensado, a ordem de grandeza da relação normalizada S_u/σ'_{v0} costuma ser de 0,25 a 0,30 (SCHNAID, 2009).

A Figura 37a expõe um gráfico com a resistência não drenada calculada a partir de ensaio de piezocone, como demonstrado na seção 2.1.1, na qual são exibidas três curvas cada uma considerando um N_{kt} com valores iguais a 9, 10 e 11. O ponto identificado na profundidade de 7m e $S_u = 15,08\text{kPa}$ corresponde à resistência obtida por um ensaio de palheta realizado nessa profundidade. Esse ponto foi utilizado para balizar a escolha do N_{kt} igual a 10 como representativo, em que esse valor também é indicado por Cordeiro (2019), como pode ser observado na Tabela 18, que identifica os valores médios utilizados pelo autor na região.

Tabela 18: Valores de N_{kt} utilizados por Cordeiro (2019).

Km	Profundidade (m)	Ensaio	Nkt	Nkt médio
30+220	7,00	Palheta	9,78	10
	3,00	Palheta	12,8	
30+480	3,40	Triaxial	16,5	13
	6,00	Palheta	9,9	
30+800	7,00	Palheta	13,6	16
	7,40	Triaxial	18,8	

Fonte: Cordeiro (2019).

O segundo gráfico, a Figura 37b, é a plotagem do perfil de S_u/σ'_{v0} . Além do traçado dessa razão, foi plotada também uma reta referência com valor constante de 0,25. A partir dessa correlação, pode-se interpretar que a argila da Figura 37b possui um grau de pré-adensamento, caracterizando valores de S_u/σ'_{v0} superiores a 0,25 para as profundidades de 0m a 8m e de 10m a 20m. O intervalo de 8m a 10m possui valores de S_u/σ'_{v0} próximos aos indicados para material normalmente adensado (NA).

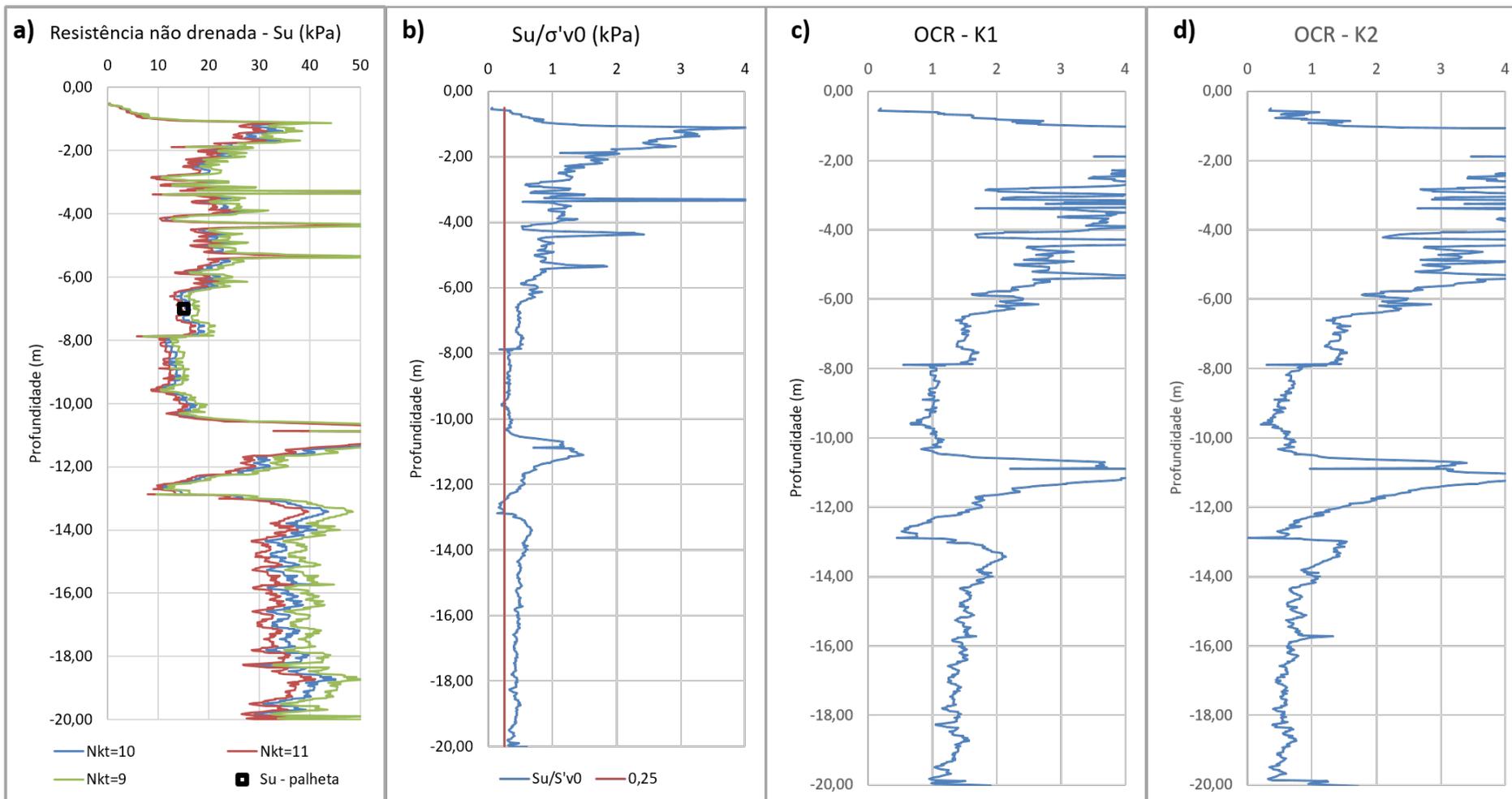
Visando identificar o grau de pré-adensamento indicado pela interpretação da Figura 37b, foram estimados perfis de OCR com base nas propostas de Kulhawy e Mayne (1990) e Chen e Mayne (1996) para K1 e K2, respectivamente. Os perfis de OCR calculados encontram-se representados na Figura 37c e na Figura 37d. De acordo com o apresentado no referencial, as propostas de Kulhawy e Mayne (1990) e Chen e Mayne (1996) envolvem a identificação de coeficientes K1 e K2, estes foram extraídos da interpretação de Cordeiro (2019), resultando em valores de K1 de 0,315 e K2

de 0,386.

O perfil de OCR obtido por K_1 (Figura 37c) indica um leve pré-adensamento com OCR em torno de 3 e 4 do início das leituras até aproximadamente 8m. Dessa profundidade até pouco mais de 10m, há uma indicação de comportamento normalmente adensado (o que corrobora o resultado encontrado considerando o índice de 0,25 para a razão S_u/σ'_{v0}) e, nas camadas seguintes, existe a caracterização de OCRs em torno de 1,5, indicando um grau de leve pré-adensamento. No caso de K_2 , do início até a profundidade de 8m, há um indício de pré-adensamento mais elevado, com OCR chegando a valores de 24 e, em seguida, o comportamento das argilas passa a ser em adensamento, com OCR inferior a 1. Entre a profundidade de 10m até pouco mais de 12m, volta a ter um indício de pré-adensamento, com OCR acima de 1.

Observando que não há justificativa para a argila local estar em processo de adensamento (OCR inferior a 1), considera-se a proposta de Kulhawy e Mayne (1990) mais adequada para a representação do perfil de OCR da seção do km 30+220. Nesse sentido, o perfil argiloso considerado representa uma camada superior até 8m com grau de adensamento mais elevado, camada de 8m a 10m NA e perfil de 8m até 22m com OCRs em torno de 1,5, perfil com características similares aos caracterizados por Cordeiro (2019) para a região de duplicação. O autor adotou para os pontos subjacentes, km 30+480 e km 30+800, perfis de OCR com base no K1 encontrado, com valores característicos de OCR de 3,5 a 1 para profundidades até 7m e igual a 1 para maiores profundidades.

Figura 37: Análise do perfil de resistência do km 30+220: a) resistência não drenada; b) resistência não-drenada normalizada pela tensão efetiva vertical; c) OCR estimado com K1 de Kulhawy e Mayne (1990) e d) K2 de Chen e Mayne (1996).



4.2 ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO KM 30+220

No presente capítulo, é apresentada uma análise da variabilidade do solo do km 30+220. A análise realizada considerou as seguintes premissas: utilizou-se o ensaio de piezocone como representativo para análise da variabilidade em profundidade, dado o número de leituras por perfil vertical; considerou-se que não havia erros de leitura ou de equipamento e que a variabilidade vinda das leituras do ensaio reflete a variabilidade inerente do material; e procurou-se caracterizar inicialmente a variabilidade das leituras básicas visando não introduzir erros de modelo e ou transformação. Nesse sentido, foram analisadas as leituras básicas do ensaio (q_t , q_c e f_s) e, posteriormente, o parâmetro S_u derivado.

A análise abrange a verificação da distribuição teórica mais aderente aos valores de resistência de ponta, atrito lateral, resistência de ponta corrigida e resistência não drenada. Na sequência, constam os resultados das escalas de flutuação calculados para os parâmetros. Esses resultados, além de auxiliarem a caracterização da variabilidade, a definição da distribuição teórica e a escala de flutuação, são dados de entrada para a geração de campos aleatórios para a resistência não drenada.

4.2.1 Distribuições dos parâmetros do solo

Para auxílio na determinação do modelo, ou seja, na obtenção da distribuição de probabilidades teóricas com melhor ajuste à distribuição empírica, foram utilizadas bibliotecas da linguagem de programação R. Uma das bibliotecas utilizadas foi *fitdistrplus*, de Muller *et al.* (2021), em que os exemplos de aplicação usaram como referência Delignette-Muller e Dutang (2015).

Em primeiro lugar, uma análise foi realizada graficamente, na qual a aderência pode ser observada a partir da comparação entre o histograma e a FDP. A estimação das distribuições teóricas pode ser realizada por alguns métodos, entre eles o método da estimação por máxima verossimilhança (MLE, do inglês *maximum-likelihood estimation*), que é um método bastante utilizado segundo Delignette-Muller e Dutang (2015). O gráfico de quantis também apresentou um indicativo da distribuição teórica mais aderente. Nele, a reta representa os valores teóricos da distribuição em avaliação e os pontos, os valores empíricos. Então, quanto mais aderente à reta, melhor o ajuste para a distribuição teórica analisada.

Descritos os métodos utilizados, são identificados na sequência os histogramas de q_c , q_t , f_s e S_u na Figura 38, na Figura 39, na Figura 40 e na Figura 41, respectivamente. Adjacentes aos histogramas, são apresentados os Gráficos Q-Q. As FDPs investigadas levaram em consideração as distribuições referências da literatura, a saber: normal, gama, lognormal, weibull e exponencial.

Figura 38: Ajuste da distribuição teórica aos dados empíricos de q_c e Gráfico Q-Q.

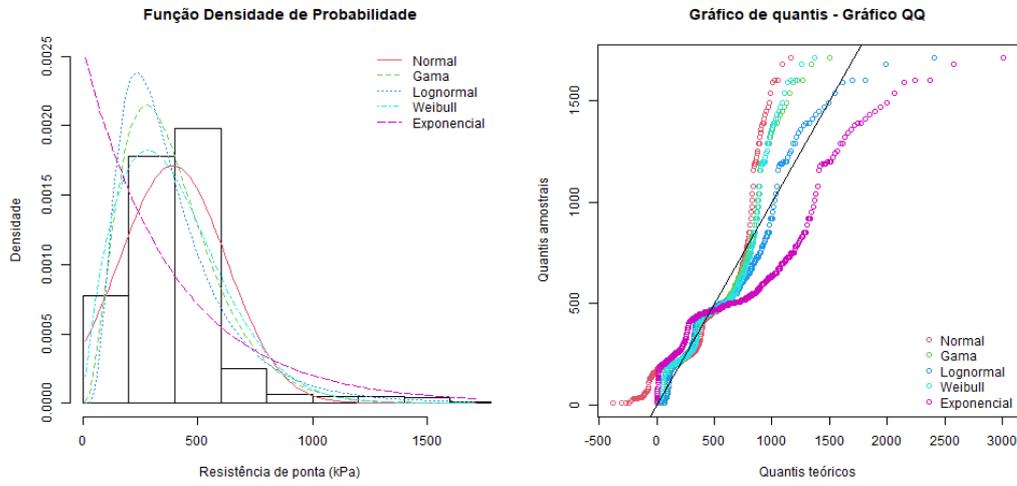


Figura 39: Ajuste da distribuição teórica aos dados empíricos de q_t e Gráfico Q-Q.

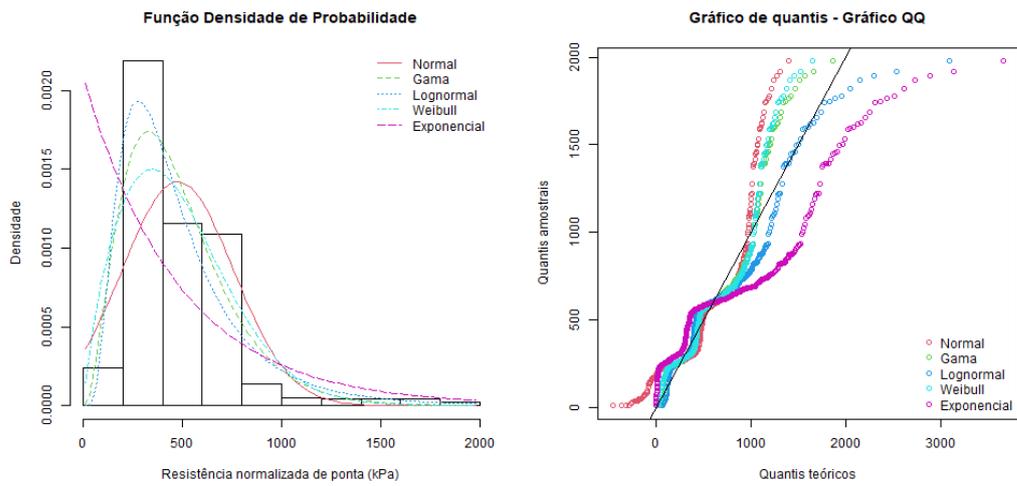


Figura 40: Ajuste da distribuição teórica aos dados empíricos de f_s e Gráfico Q-Q.

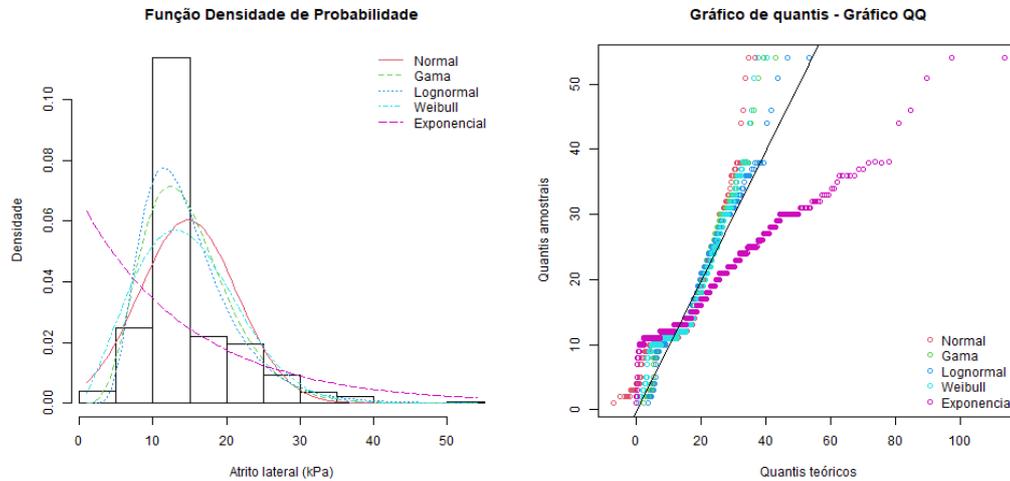
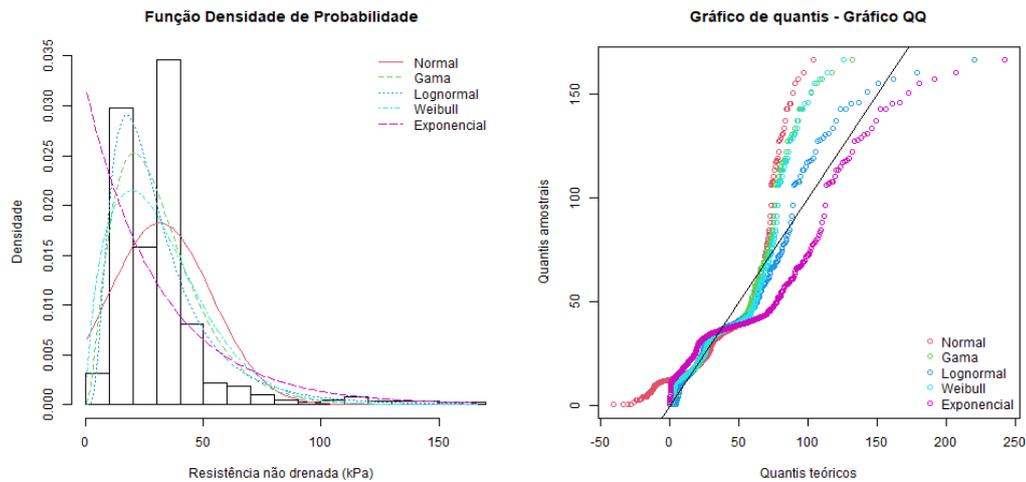


Figura 41: Ajuste da distribuição teórica aos dados empíricos de S_u e Gráfico Q-Q.



Os resultados obtidos para a resistência de ponta na Figura 38, entre as FDPs verificadas, indicam um melhor ajuste da função lognormal. Apesar de o pico da função teórica não corresponder ao pico dos dados empíricos, no Gráfico Q-Q a lognormal é a função que mais se aproxima da reta. A Figura 39 indica os resultados da resistência real mobilizada, q_t . Uma vez mais, o pico das funções teóricas não se ajustaram ao pico dos dados empíricos, visto que a função lognormal se aproximou mais nesse quesito. Além disso, essa função também se apresenta mais adequada através do Gráfico Q-Q.

No caso dos resultados do atrito lateral, que constam na Figura 40, nenhuma das funções teóricas apresentou aderência ao pico dos dados. No entanto, analisando o Gráfico Q-Q, a função mais aderente foi novamente a lognormal. Por fim, os gráficos da Figura 41 para resistência não

drenada também indicam a FDP lognormal como mais ajustada aos dados empíricos.

Além da verificação gráfica, foi possível também aplicar o usual teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S), usado para diversos tipos de distribuição de probabilidades. Barbeta, Reis e Bornia (2010) demonstraram que essa estatística é obtida a partir da diferença absoluta entre os valores teóricos da distribuição teórica testada e os dados empíricos em uma distribuição de frequências acumuladas. Para avaliação da estatística, essa pode ser comparada com um valor crítico tabelado, que depende do nível de significância (α) estabelecido e do tamanho amostral, em que é comum adotar esse nível como 0,05 (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2010). Os autores então resumem:

- Estatística K-S < Valor crítico - aceitar H_0 .
- Estatística K-S > Valor crítico - rejeitar H_0 .

H_0 representa a hipótese inicial e, no caso de K-S, refere-se à aderência da distribuição teórica testada aos dados empíricos. A estatística K-S para os dados da resistência não drenada resultou em um valor 0,1041, obtido pelo pacote da linguagem R. Como pode ser observado pela Tabela 19, mesmo com a atribuição de níveis de significância diferentes de 0,05, o teste indica a rejeição de H_0 , ou seja, a rejeição de que a FDP teórica lognormal adere-se aos dados empíricos.

Tabela 19: Estatística do teste de K-S e conclusão sobre aderência da distribuição de probabilidades lognormal.

Nível de significância	Valor crítico	Estatística K-S	Rejeitar H_0 ?
0,2	0,03267	0,1041	Sim
0,15	0,0348	0,1041	Sim
0,1	0,03724	0,1041	Sim
0,05	0,04152	0,1041	Sim
0,01	0,04976	0,1041	Sim

Essa estatística foi verificada também por meio do *software* estatístico EasyFit, que também apontou para a rejeição de H_0 , inclusive considerando outros testes como Qui-Quadrado. Ainda sobre o programa, ele verificou a aderência de até 23 FDPs e classificou as distribuições mais aderentes. A função teórica lognormal, mesmo considerada não adequada pelos testes, encontrou-se na terceira posição.

A partir da verificação gráfica, há um indício de que a função densidade de probabilidade lognormal pode ser tida como melhor ajustada para os parâmetros do estudo de caso, apesar de o teste K-S não ter apontado essa informação. Dessa forma, mantém-se essa proposta, pois o resultado corresponde ao exposto pela Tabela 8, apresentada na Revisão Bibliográfica. Na Tabela 8 os valores de resistência de cone, por exemplo, mostraram-se mais aderentes à distribuição de probabilidade

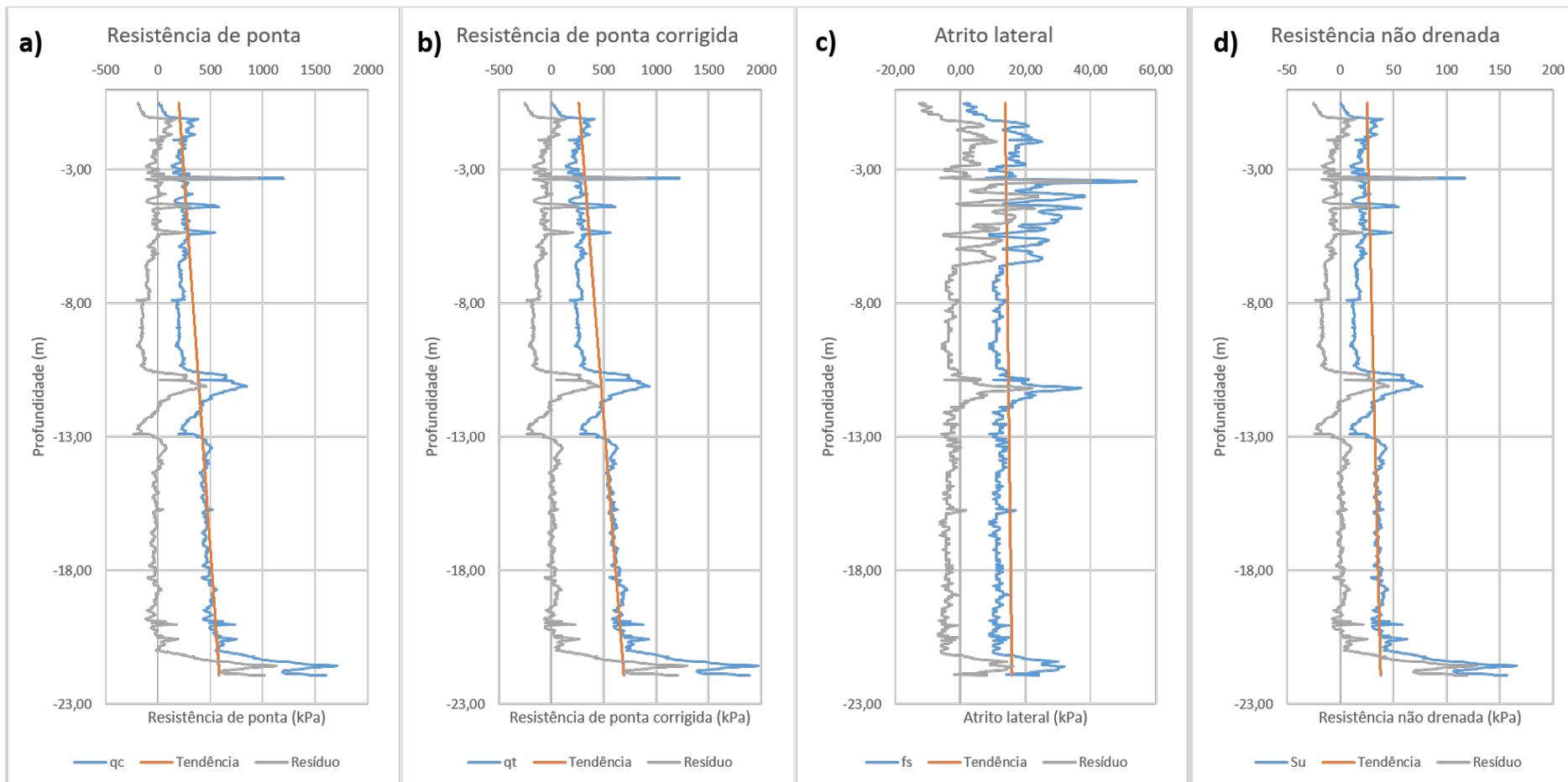
normal e lognormal. Ainda, a resistência ao cisalhamento estava melhor ajustada também a essas duas FDPs. Portanto, a distribuição de probabilidades lognormal foi usada para a geração do campo de S_u .

4.2.2 Escala de flutuação

A escala de flutuação é um dado de entrada importante para a geração de campos aleatórios. Na presente pesquisa, a escala de flutuação vertical foi calculada por meio de três metodologias: Método Expedito de Vanmarcke (MEV), Integração da função de Autocorrelação da Amostra (IAA) e Ajuste do Modelo de Autocorrelação (AMA), por meio de planilha Excel.

A Figura 42 apresenta os gráficos resultantes do cálculo da escala de flutuação pelo MEV para q_c (Figura 42a), q_t (Figura 42b), f_s (Figura 42c) e S_u (Figura 42d). Para obtenção da escala de flutuação por esse método, buscou-se zerar a média do resíduo da tendência utilizando uma equação linear, ajustando a equação até que graficamente também fosse possível constatar a tendência. Segundo cálculo apresentado na seção 2.3, os valores de escala de flutuação obtidos foram iguais a 0,33m para q_c , 0,34m para q_t , 0,62m para f_s e 0,34m para S_u .

Figura 42: Escala de flutuação pelo Método Expedito de Vanmarcke: a) Resistência de ponta; b) Resistência de ponta corrigida; c) Atrito lateral; d) Resistência não drenada.



Um segundo valor de escala de flutuação para cada propriedade do solo foi obtido pelo método IAA. Nesse método, a escala de flutuação corresponde a duas vezes a área abaixo da parte positiva da função de autocorrelação. A Figura 43, a Figura 44, a Figura 45 e a Figura 46 apresentam os gráficos das autocorrelações da amostra para q_c , q_t , f_s e S_u , respectivamente. Os valores obtidos para a escala de flutuação considerando esses gráficos são 3,29m; 4,24m; 1,38m e 2,32m, nessa ordem.

Também é possível observar nos gráficos curvas das funções de autocorrelação teóricas Exponencial, Exponencial Quadrado, Cosseno Exponencial e Markov de segunda ordem. Essas funções foram utilizadas para o cálculo da escala de flutuação pelo método AMA. Para essa metodologia, buscou-se um valor para a escala de flutuação que melhor se ajustava às curvas. Como resultado, foram obtidos valores de 1,25m para q_c , 1,35m para q_t , 0,9m para f_s e 1,1m para S_u . Esses resultados encontraram-se entre os valores obtidos pelo MEV e pelo IAA.

Figura 43: Autocorrelação dos dados de q_c pela distância de separação vertical.

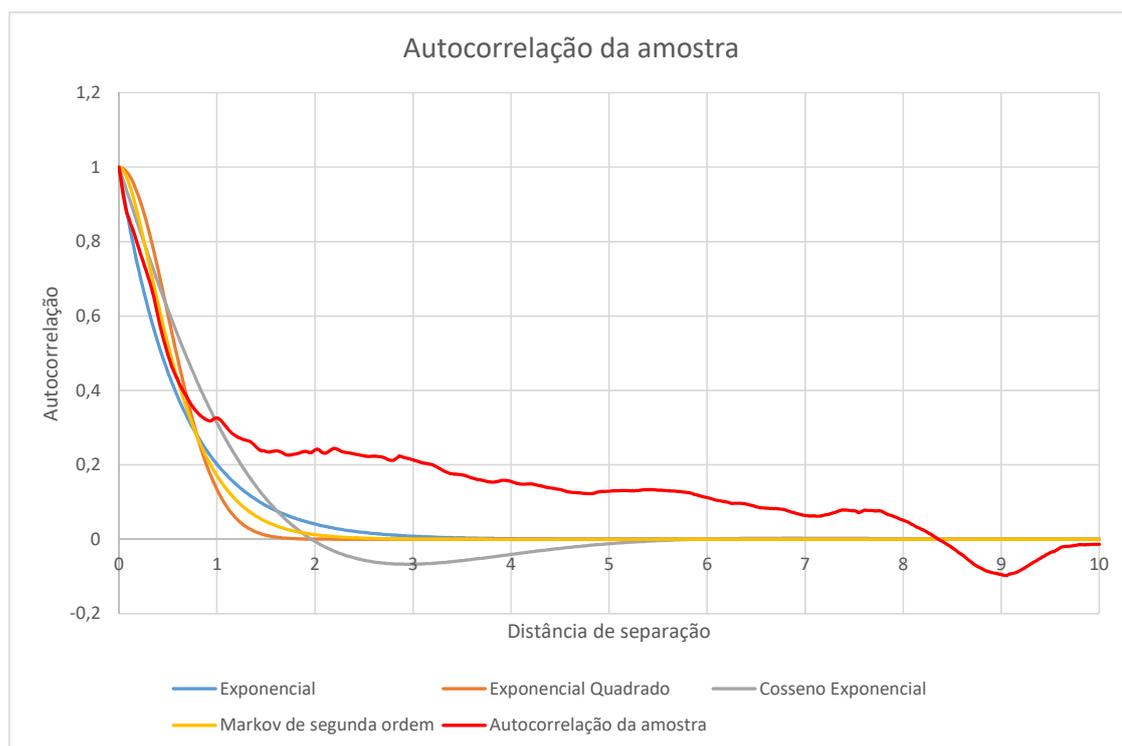


Figura 44: Autocorrelação dos dados de q_t pela distância de separação vertical.

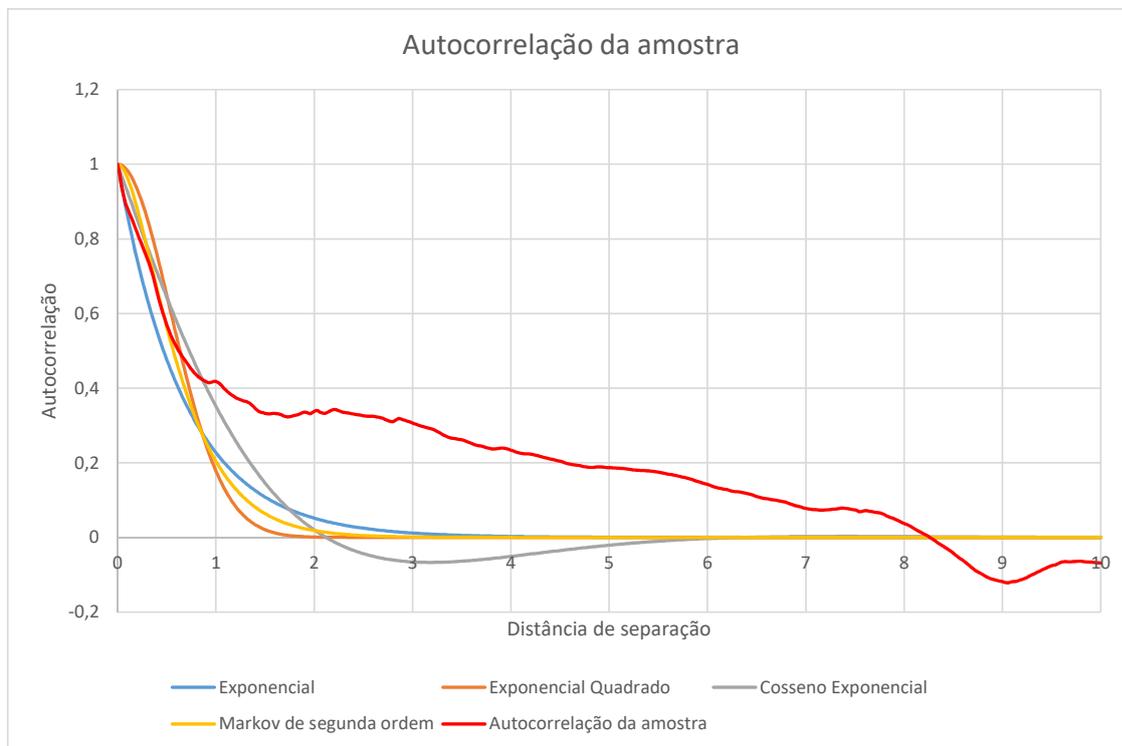


Figura 45: Autocorrelação dos dados de f_s pela distância de separação vertical.

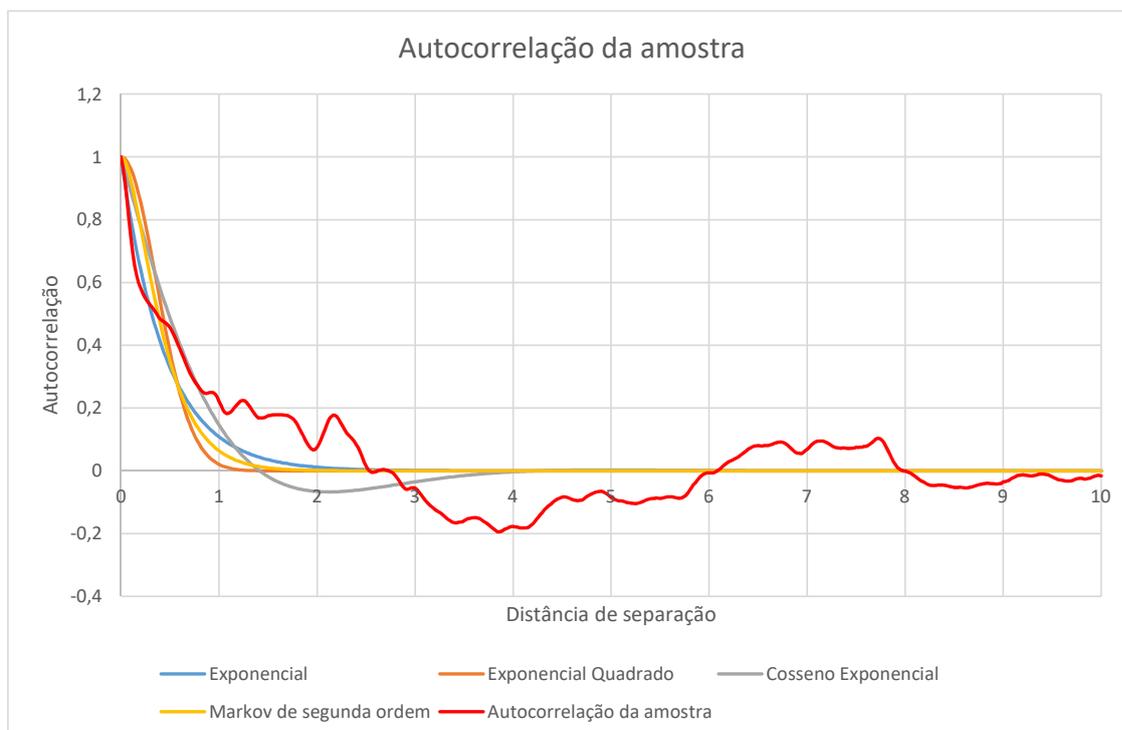
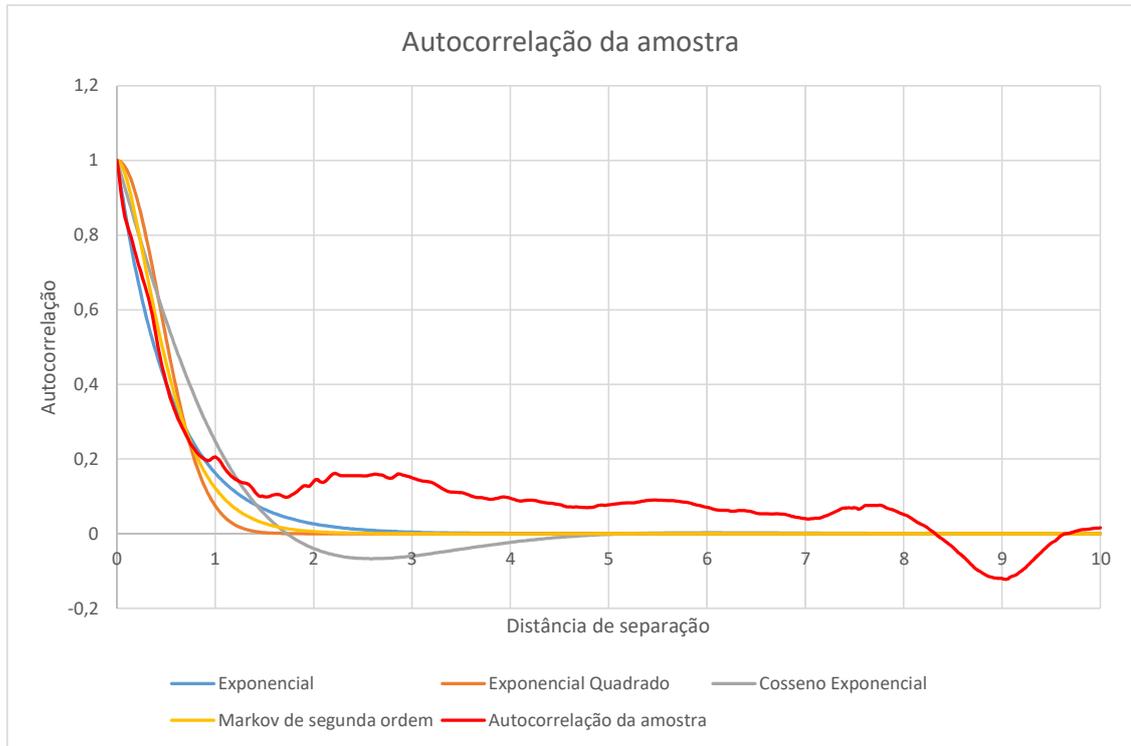


Figura 46: Autocorrelação dos dados de S_u pela distância de separação vertical.



A Tabela 20 resume os valores encontrados para a escala de flutuação por cada uma das metodologias e para cada propriedade do solo. Além dos resultados apresentados anteriormente, constam os valores quando consideradas a remoção da tendência dos dados, ou seja, as escalas de flutuação foram calculadas também para os valores residuais dos parâmetros.

Tabela 20: Escalas de flutuação obtidas por três métodos para os parâmetros do solo.

Parâmetro	Sem remoção da tendência			Residual	
	MEV	IAA	AMA	IAA	AMA
q_c	0,33	3,29	1,25	0,77	0,9
q_t	0,34	4,24	1,35	1,5	0,9
f_s	0,62	1,38	0,9	1,65	1,5
S_u	0,34	2,32	1,1	0,87	0,9

Em resumo, pode-se observar a partir da Tabela 20 que os diferentes métodos caracterizaram escalas de flutuação de distintas magnitudes e que houve no geral uma boa concordância nas escalas calculadas pelos parâmetros q_c , q_t e S_u . Em relação aos valores encontrados pelo MEV, esse apresentou as menores escalas de flutuação da ordem de 0,34m para os parâmetros q_c , q_t e o derivado S_u . A escala de flutuação calculada pelo MEV no caso do parâmetro f_s foi de 0,62m.

Considerando os valores sem remoção da tendência, o método IAA apresentou maior amplitude para a escala de flutuação com valores da ordem de 3,29m e 4,24m para as leituras q_c e

q_t , respectivamente, 2,32m quando considerado S_u e 1,38m, para f_s . Em comparação com os resultados obtidos para os valores residuais, esses últimos são menores (com exceção de f_s). Com essa diminuição, os valores se aproximaram mais dos resultados obtido pelo MEV.

Por fim, pelo método AMA, as escalas de flutuação foram de forma geral próximas quando consideradas as leituras de q_c , q_t e S_u : 1,25m; 1,35m e 1,1m, nessa ordem. O parâmetro f_s também apresentou maior discrepância por esse método. Por sua vez, em comparação com os valores residuais, as escalas de flutuação reduziram (com exceção novamente de f_s) e se aproximaram dos valores de MEV. Essa diminuição resulta em uma menor discrepância entre os valores calculados pelo MEV e IAA/AMA.

Perini (2021) encontrou comportamento similar ao avaliar os diferentes métodos para cálculo da escala de flutuação, ou seja, o MEV resultando em menores valores e o método IAA com maior amplitude. Além disso, a maior parte desses resultados está de acordo com o que foi encontrado na literatura como referência (seção 2.3.4).

4.3 CAMPO ALEATÓRIO

Nesse item, são apresentados aspectos pertinentes à definição do campo aleatório utilizado para modelagem do solo de fundação do aterro construído na região da BR-470, do km 30+220. Dessa forma, como apontado anteriormente, um campo foi gerado para a resistência não drenada, em que a FDP utilizada para geração do campo e os valores estatísticos necessários foram obtidos por meio dos dados do perfil de S_u sem a remoção da tendência e apresentado no item 4.2.1, a saber, perfil calculado através de medidas de ensaio de piezocone e N_{kt} derivado a partir de medida pontual de S_u por ensaio de palheta. A partir desses dados, foi possível o cálculo da média e desvio padrão:

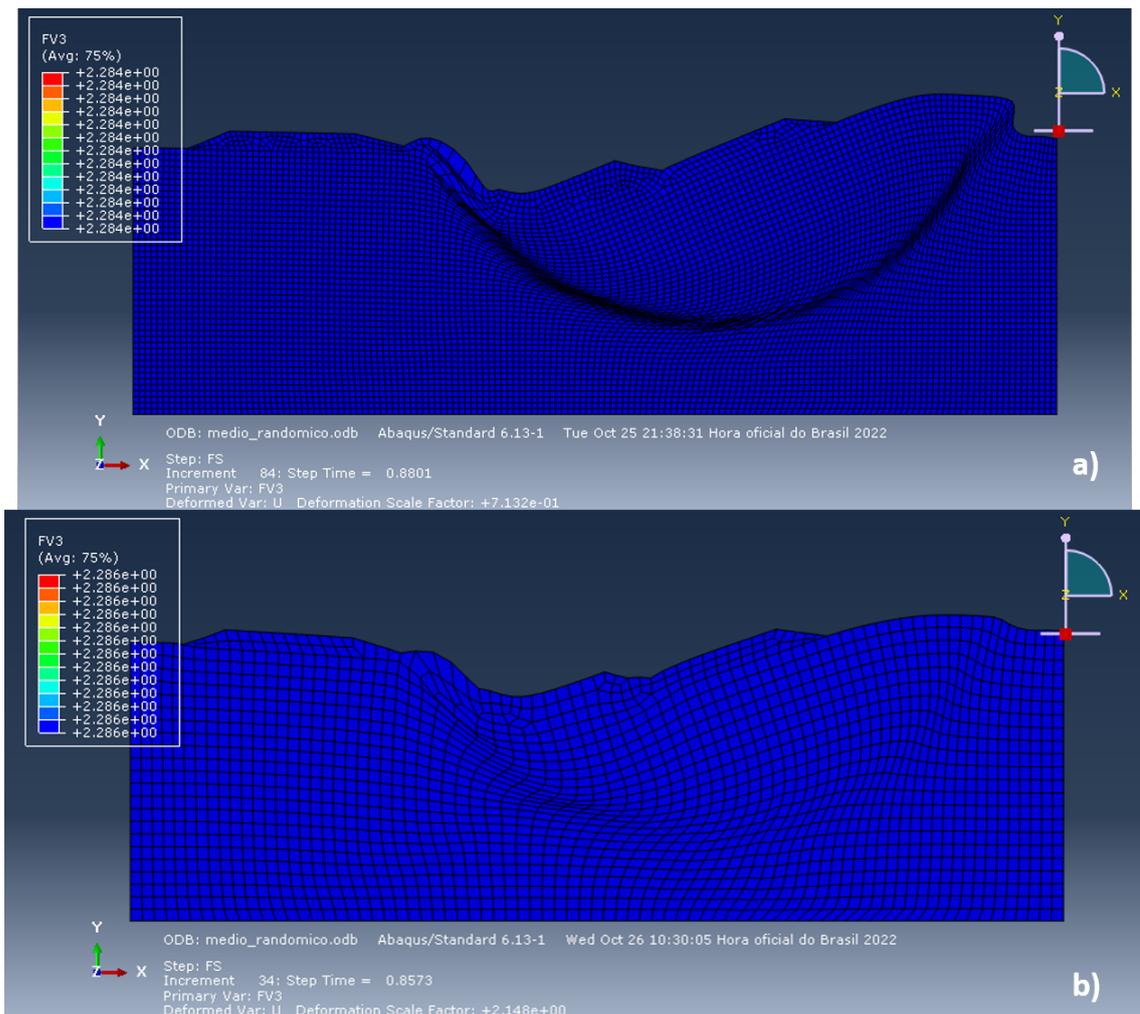
- Média: 25,97kPa.
- Desvio padrão: 1,87kPa.

No caso da escala de flutuação vertical, que foi calculada por três métodos diferentes, conforme explicação do item 4.2.2, considerou-se o menor valor apresentado para a propriedade da resistência não drenada, ou seja, 0,34. Por sua vez, a escala de flutuação horizontal utilizada para geração do campo aleatório foi igual a 10,0m, como também apresentado no item 4.2.2.

Para geração do campo aleatório, o *software* RFEM necessitou, por fim, do tamanho dos elementos da malha e da dimensão. Nesse ponto objetivou-se que a malha do campo fosse a mesma adotada para a malha de cálculo pelo método de elementos finitos. Dessa forma, inicialmente foi feita uma análise de um tempo inicial de processamento do *software* Abaqus ainda sem considerar o campo aleatório. Considerando uma malha quadrada de 0,05m x 0,05m, foi realizado o mesmo

cálculo de fator de redução, levando em conta o valor médio de S_u , 25,97, o que demandou aproximadamente 1h para uma simulação, de acordo com a Figura 47a, resultando em um FS de 2,284. Portanto, aumentou-se o tamanho do elemento da malha para 1,0m x 1,0m. Com essa dimensão, o processamento requereu cerca de 5min, resultando em um FS próximo de 2,286, segundo a Figura 47b.

Figura 47: Malhas utilizadas para geração de campo aleatório: a) com dimensão de 0,05m x 0,05m b) com dimensão de 1,0m x 1,0m.



Após definição do tamanho do elemento, a proporção de elementos 1,0m x 1,0m foi lançada no *software* RFEM e foram buscados 5.000 campos aleatórios para simulação e cálculo da probabilidade de falha. Um exemplo de campo aleatório pode ser visualizado na Figura 48. A escala de cores de representação pelo programa indica que elementos mais escuros representam valores mais altos, e elementos mais claros representam valores mais baixos. Na sequência, um resumo das informações utilizadas para geração dos campos aleatórios do estudo de caso encontra-se na Tabela 21.

Figura 48: Exemplo de um campo aleatório gerado pelo método LAS.

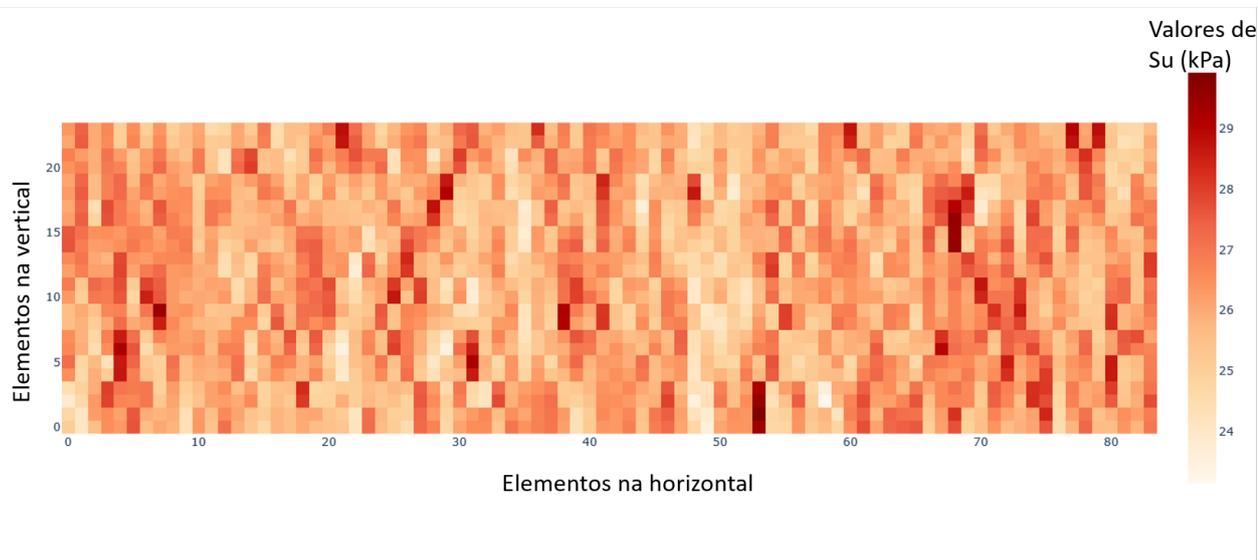


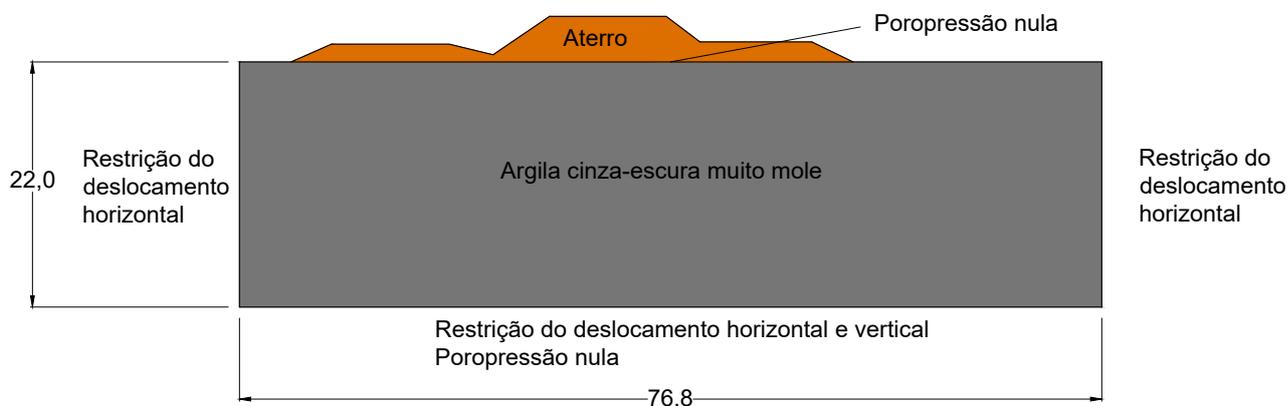
Tabela 21: Resumo dos dados de entrada para criação do campo aleatório do estudo de caso.

Parâmetro	Valor	Unidade
FDP	lognormal	-
Média	25,97	kPa
Desvio padrão	1,87	kPa
Esc. flutuação vertical	0,34	m
Esc. flutuação horizontal	10	m
Discretização da malha	1 x 1	m
Geometria	76,8 x 22,0	m
Função covariância espacial	Markov	-

4.4 MODELAGEM NUMÉRICA

Nessa seção, são apresentadas a modelagem numérica e as análises dos resultados. O modelo consiste em uma seção transversal que compõe a Rodovia BR-470, no estado de Santa Catarina. Essa seção é composta por dois aterros rodoviários (aterro antigo, construído na década de 1970 e 1980 e o novo aterro da duplicação) e uma berma de equilíbrio apoiados sobre solo homogêneo e mole, caracterizado por Cordeiro (2019) como uma argila cinza-escura muito mole. A Figura 49 ilustra a seção transversal considerada. Objetivou-se a verificação da estabilidade dos aterros sobre o solo mole levando em conta um carregamento rápido devido à construção do aterro de duplicação e, portanto, em condição não drenada. Ressalta-se que não foi objetivo do presente trabalho a verificação da magnitude das deformações, nem das previsões de recalques. A modelagem numérica do estudo de caso foi realizada no *software* Abaqus, versão 6.13.

Figura 49: Dimensões em metros do modelo e condições de contorno.



Na Figura 49 também estão indicadas as dimensões da fundação argilosa, com 22,0m de espessura e 76,8m de comprimento de seção transversal. Há também indicações das condições de contorno consideradas no modelo, com restrição do deslocamento horizontal nas laterais e restrição do deslocamento horizontal e vertical na região inferior. Ressalta-se que a inserção das poropressões é necessária apenas para processamento do material no programa.

No que concerne aos dois materiais apresentados, a Tabela 22 identifica os valores atribuídos às propriedades do aterro compactado e da berma e à fundação em argila-cinza escura muito mole. O critério de ruptura de Mohr-Coulomb foi utilizado tanto para o aterro quanto para a fundação. Os dados da Tabela 22 têm como referência Cordeiro (2019), e, com exceção do campo aleatório indicado para a resistência não drenada, os outros valores foram utilizados na modelagem numérica realizada pelo autor, que também estudou a região, como citado anteriormente. O campo aleatório da resistência não drenada foi inserido em formato de tabela no programa, conforme explicação da seção 3.1, em que constou o valor adotado para o parâmetro e sua coordenada.

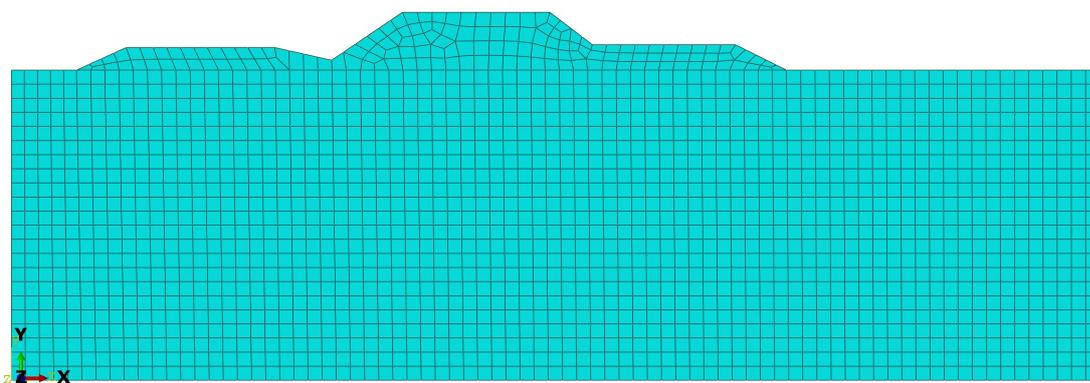
Tabela 22: Valores atribuídos aos parâmetros utilizados na modelagem numérica.

Material	Parâmetros	Valor
Aterro compactado e berma	Peso específico	20 kN/m ³
	Ângulo de atrito	35°
	Coesão	5 kPa
	Módulo de elasticidade	2,5x10 ⁴ kPa
	Coefficiente de Poisson	0,3
Argila cinza-escura muito mole	Peso específico	16 kN/m ³
	Ângulo de atrito	0°
	Resistência não drenada	Campo aleatório
	Módulo de elasticidade	1,3 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,45

A modelagem foi realizada com uma malha quadrática de 4 nós com deformação bilinear e

poropressão, cujo código no Abaqus corresponde a CPE4P. Aplicou-se uma malha estruturada para a fundação em argila mole, e, para o aterro, essa foi aplicada como livre. A configuração inicial da malha pode ser observada na Figura 50, a qual foi discutida anteriormente. As dimensões do elemento quadrático utilizado nas simulações foi de 1,0m x 1,0m. Como explicado previamente, em uma tentativa anterior, o tamanho do elemento considerara a metade das dimensões, e isso causou um significativo aumento do tempo de processamento do modelo.

Figura 50: Malha utilizada para o modelo numérico do estudo de caso.



Para a análise de estabilidade do talude, foi utilizado o método de redução de parâmetros de resistência para obtenção dos valores de fator de segurança, como indicado na seção 3.1. A Figura 51 ilustra a cunha de ruptura para um dos modelos processados, em que o FS obtido nesse caso é igual a 2,275. Apesar de estar identificada a magnitude do deslocamento, não é objeto de discussão da atual pesquisa, visto que essa possui apenas função de visualização para identificação da cunha de ruptura. Também foi plotada a Figura 52, que identifica a deformação plástica equivalente.

Figura 51: Cunha de ruptura para estudo de caso, com FS=2,275.

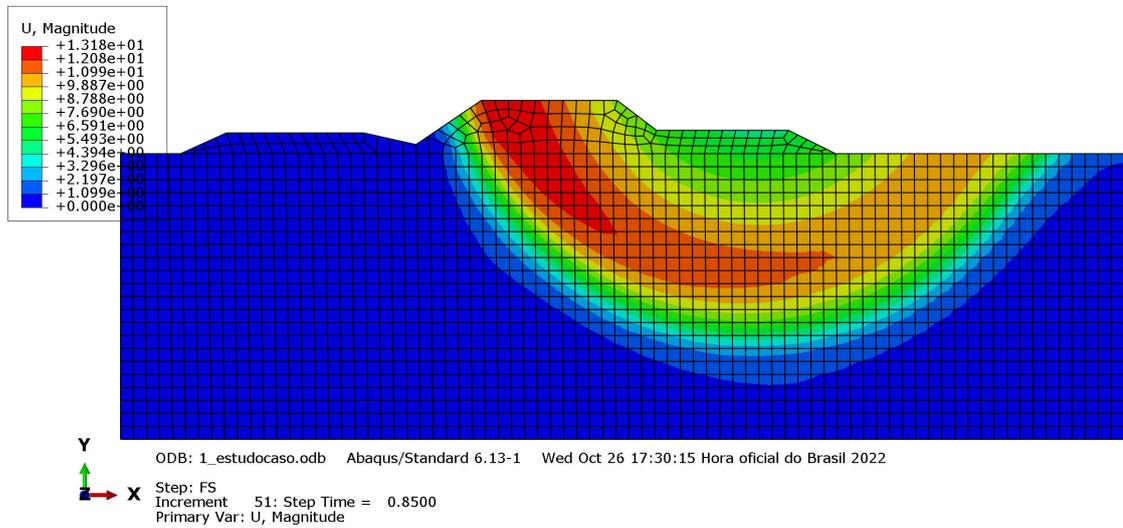
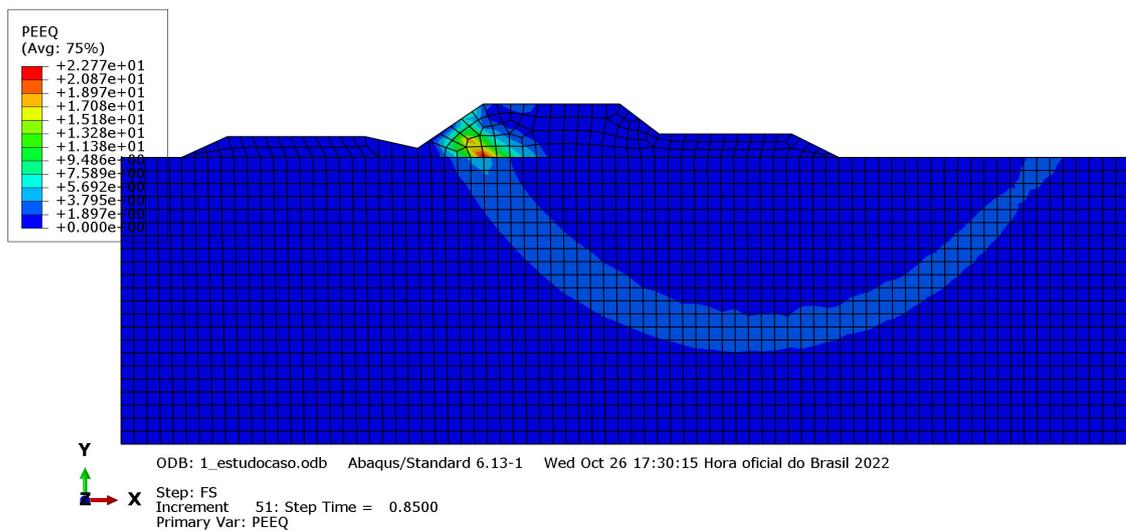


Figura 52: Deformação plástica equivalente para estudo de caso, com FS=2,275.



A maioria dos resultados obtidos assemelharam-se à Figura 51, porém, em alguns casos, o FS resultou em valores inferiores a 1,0, o que indicou uma instabilidade. A Figura 53 ilustra a cunha de ruptura alcançada com a plotagem da deformação, assim como a Figura 51. Em seguida, a Figura 54 ilustra a configuração da cunha de ruptura para o mesmo modelo, no entanto considerando a plotagem da deformação plástica equivalente. Uma análise que pode ser feita é de que aparenta ter havido uma ruptura geral da fundação e não uma instabilidade do aterro, uma vez que há um deslocamento vertical para baixo do aterro e, nas suas laterais, há deslocamento vertical para cima.

Figura 53: Caso de ruptura para estudo de caso, com $FS < 1,0$, com plotagem da deformação.

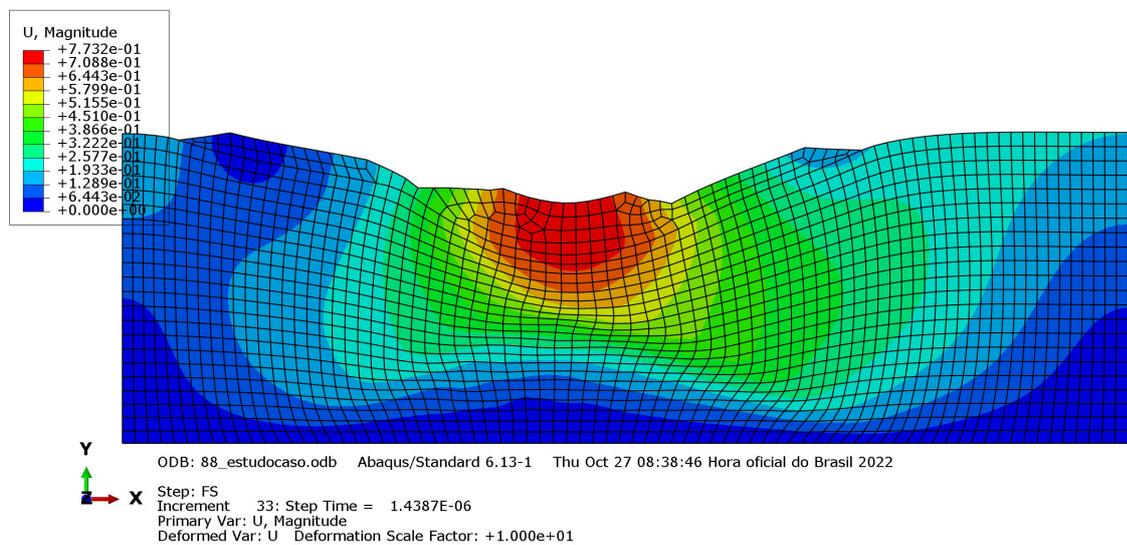
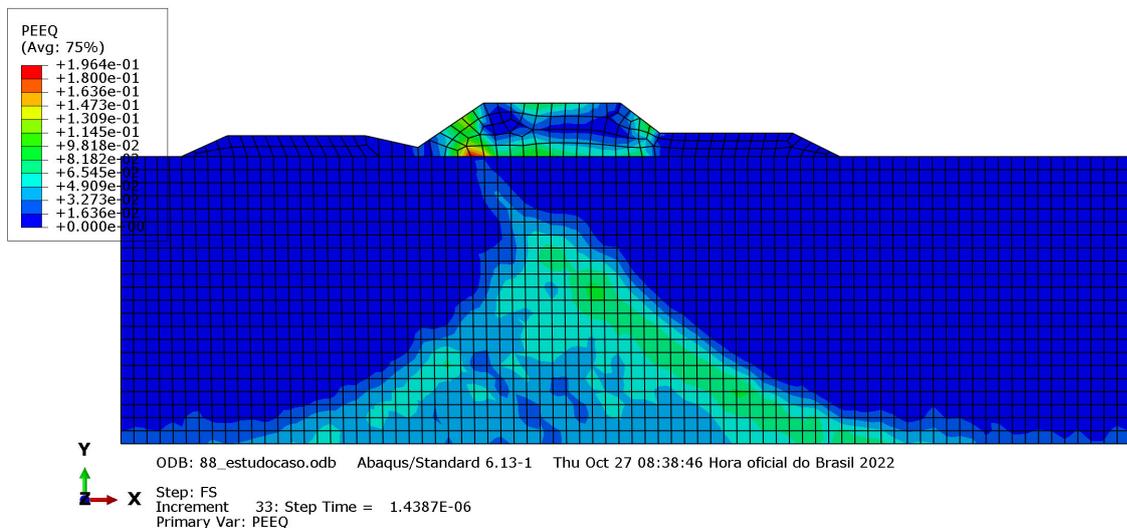
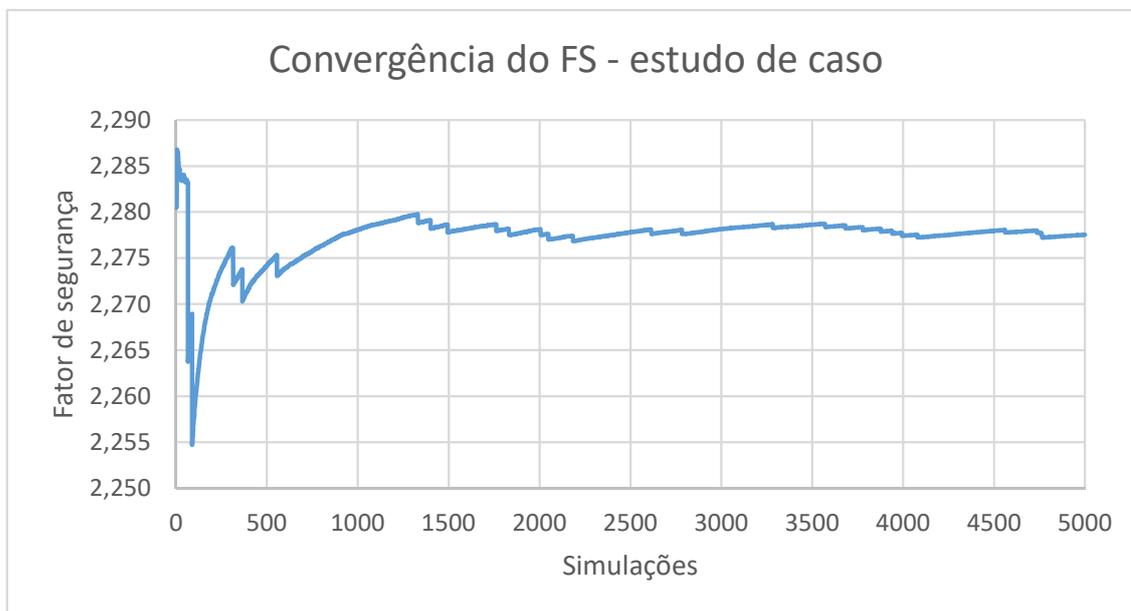


Figura 54: Caso de ruptura para estudo de caso, com $FS < 1,0$, com plotagem da deformação plástica equivalente.



As configurações de cunhas de ruptura e os fatores de segurança foram armazenados em cada uma das simulações realizadas, em que 5.000 modelos foi o número preestabelecido pela autora com base em verificação da literatura. Para indicação da convergência dos valores de FS, foi realizado um cálculo das médias pelo número de simulações, como identificado na Figura 55. Pode-se observar que as médias do FS variaram entre 2,25 e 2,29, em que o valor de FS estabilizou em aproximadamente 2,2755 e a partir da simulação 4.000.

Figura 55: Estabilização do fator de segurança com o número de simulações - estudo de caso.



No histograma da Figura 56, que plota os valores resultantes da modelagem, visualiza-se mais claramente a variação dos valores de FS obtidos e há um indicativo também de sua frequência. Todavia, esse gráfico é apenas um recorte dos resultados, uma vez que foram alcançados 27 fatores de segurança com valores inferiores a 1,0. O histograma com dados completos pode ser observado na Figura 57.

Figura 56: Histograma dos FS resultantes do estudo de caso, sem apresentar rupturas.

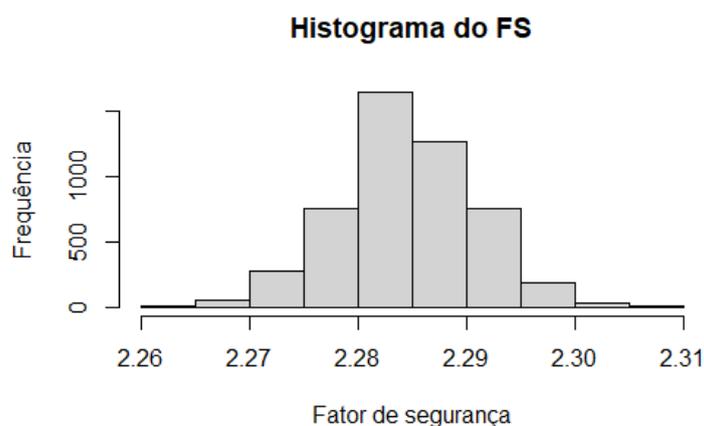
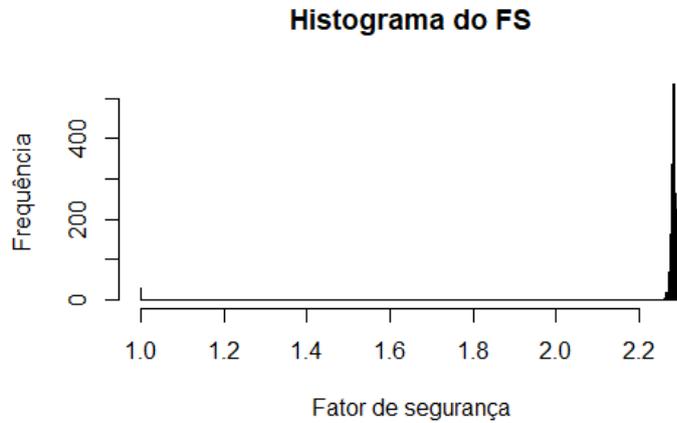


Figura 57: Histograma dos FS resultantes do estudo de caso com todos.



Por fim, conforme apontado anteriormente, das 5.000 simulações realizadas, apenas 27 apresentaram FS com valores inferiores a 1,0, assim foi possível obter uma probabilidade de falha de 0,54%. Esse valor é considerado aceitável na maioria dos casos, exceto quando há risco de perda humana, segundo critérios de Santamarina, Altschaeffl e Chameau (1992).

4.5 DISCUSSÃO

Neste item, considerações são feitas relativas aos dados utilizados e aos resultados obtidos para o estudo de caso de aterro sobre solos moles da BR-470, km 30+220.

4.5.1 Caracterização geotécnica e de estatística dos parâmetros

No que concerne à caracterização geotécnica e de estatística dos parâmetros, uma das dificuldades encontradas foi a identificação das funções de distribuição teóricas de aderência aos dados. A verificação da aderência baseou-se na análise gráfica, dado que os testes realizados apontaram para a rejeição das distribuições teóricas testadas, e nas FDPs encontradas na literatura para o caso de argilas.

Outro ponto a ser destacado é a falta de ensaios complementares para o km 30+220, principalmente ensaios de palheta e triaxiais em mais profundidades. Com apenas um ensaio de palheta, há incerteza no fator N_{kt} como método de transformação, que possui dependência direta da qualidade dos ensaios e que por meio do qual é comum serem caracterizados N_{kt} s distintos se diferentes ensaios forem realizados, como foi possível observar na Tabela 18 de Cordeiro (2019), pois esses fatores provêm de uma interpretação indireta. Dessa forma, recomenda-se que um conjunto complementar de sondagens seja utilizada em trabalhos futuros.

Além disso, notou-se que cada quantificação precisa ser realizada com cautela e que sejam avaliados perfis de classificação em conjunto com a definição de dados estatísticos, ou seja, é necessário tratamento dos dados, como remoção ou substituição de valores, e que métodos qualitativos mais rigorosos devam ser estudados. No presente trabalho, as sete últimas leituras e dados foram removidas dos perfis de q_c , q_t , f_s e S_u , pois essas eram classificadas como mistura de areias e areias com pedregulhos. Como causa disso, a resistência não drenada apresentou valores altos, o que não era desejável também pela perda de homogeneidade dos dados.

Ademais, há uma limitação do uso do método LAS pelo *software* RFEM, em que as distribuições teóricas aceitas para geração do campo aleatório podem ser somente normal, lognormal ou uma função limitada. Portanto, recomenda-se que outros métodos sejam procurados e testados.

4.5.2 Probabilidade de falha da seção BR-470, km 30+220

No que concerne aos resultados obtidos para probabilidade de falha e fator de redução, também há pontos a serem destacados. O valor para o qual o fator de redução convergiu foi de aproximadamente 2,28. Esse resultado encontra-se na mesma ordem de grandeza do fator obtido por Cordeiro (2019) e Dienstmann, Cordeiro e Sakamoto (2021), em que os autores trabalharam com valores médios para as camadas argilosas e arenosas para o perfil do km 30+460 e obtiveram resultado de 2,19 para o fator de redução para modelo em elementos finitos e 2,24 para o fator de segurança por equilíbrio limite.

Salienta-se também que, devido ao tempo demandado para modelagem de campo aleatório com cálculo de redução de fatores em elementos finitos, foi modelado apenas o campo aleatório de S_u considerando o método de geração de campos por LAS, com distribuição teórica do parâmetro como lognormal e escala de flutuação vertical de 0,34. Não foi calculada a escala de flutuação horizontal, para essa propriedade foi somente adotado um valor condizente com os intervalos de valores encontrados na literatura. Dessa forma, sugere-se que em trabalhos futuros sejam avaliados modelos com diferentes valores para essa propriedade. Alternativamente, recomenda-se o desenvolvimento de modelos tridimensionais.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo buscou apresentar o cálculo da probabilidade de falha de aterros sobre solos moles levando em conta a variabilidade espacial inerente do solo por meio de campos aleatórios. Os campos aleatórios foram considerados parâmetros de entrada em um conjunto de modelagens em *software* de elementos finitos para análise de falha e cálculo de fator de redução da resistência.

Para implementação de campos aleatórios, o método LAS foi utilizado, visto que essa metodologia é amplamente utilizada pela bibliografia. O método possui aplicação na área geotécnica e encontra-se implementado no *software* RFEM. A partir desse programa, foi possível tanto obter apenas o campo aleatório quanto obter probabilidade de falha de taludes, em que para esta última aplicação foi utilizado como verificação das implementações realizadas. As verificações foram feitas com base em dois estudos de caso, Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017) e Liu *et al.* (2018) e mostraram resultados satisfatórios.

Após verificada a implementação de campos aleatórios em casos de estabilidade de taludes, realizou-se estudo de caso de aterros sobre solos moles, BR-470, seção km 30+220. A seção avaliada faz parte do projeto de duplicação da BR-470 que passa por depósitos de argila mole, região que foi objeto de estudo de Cordeiro (2019) e Grandó (2018).

Mais especificamente a seção objeto de estudo foi avaliada visando identificar parâmetros estatísticos representativos e distribuição de melhor aderência para análise da variabilidade em profundidade, dado o número de leituras por perfil vertical; considerou-se que não havia erros de leitura ou de equipamento e que a variabilidade vinda das leituras do ensaio reflete a variabilidade inerente do material; e procurou-se caracterizar inicialmente a variabilidade das leituras básicas, visando não introduzir erros de modelo e/ou transformação. Observou-se que no teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov os resultados não foi satisfatórios, no qual se considerou a função densidade de probabilidade teórica lognormal para S_u pelo aspecto gráfico e por indicações da literatura. Além disso, buscou-se analisar as distribuições de outros parâmetros do solo para indicação de um comportamento geral da sondagem.

Ainda sobre a caracterização estatística do local, foi calculada a escala de flutuação vertical por três metodologias diferentes e para outros parâmetros além de S_u para, novamente, haver uma indicação de um comportamento geral. A obtenção do parâmetro é complexa e não há convergência entre as metodologias e, para o estudo de caso, q_t teve a maior variação, com um intervalo de 0,34 a 4,22. Para S_u , ele variou de 0,34 a 2,29, em que o menor valor foi considerado para a modelagem numérica por apresentar maior variabilidade e, possivelmente, maior variação de FS. Assim, a caracterização estatística do local também foi atingida como objetivo específico.

A partir do levantamento dos dados e da geração dos campos aleatórios, foram simuladas 5.000 seções transversais em elementos finitos para obtenção do FS e da probabilidade de falha. O

resultado de convergência obtido para FS, 2,275 é um valor considerado alto, e a probabilidade de falha de 0,54%, considerada baixa. Outra observação a ser feita é que houve pouca variação de resultados para FS: 2,26 - 2,31. Isso pode ser explicado pelo fato de se ter utilizada uma camada argilosa homogênea, com média de S_u alta, de 25,97 e desvio padrão pequeno de 1,87.

Ressalta-se mais uma vez o tempo demandado para a realização das simulações. Para uma análise probabilística, são necessárias milhares de simulações até a convergência de FS ou de probabilidade de falha. A Tabela 23 identifica novamente os tempos requeridos para modelos da literatura acrescidos do estudo de caso. Para este último, foram necessários 11min para cada simulação. As 917h totais resultam da multiplicação do tempo unitário pela quantidade total de simulações. No entanto, na realidade, necessitou-se de menos tempo pela simultaneidade de processamento conseguido por meio de prompt de comando e não necessitar de interface gráfica do Abaqus.

Tabela 23: Tempos totais de processamento da modelagem numérica.

Modelo	Tempo/simulação	Nº simulações	Tempo total
Palomino-Tamayo, Awruch e Rodríguez-Calderón (2017)	2min	4.000	133h
Liu <i>et al.</i> (2018)	6min	5.000	500h
Estudo de caso	11min	5.000	917h

Referências

- ABNT. *ABNT NBR 10905: Solo: Ensaio de palheta in situ*. Rio de Janeiro, 1989.
- ABNT. *ABNT NBR 12069: Solo: Ensaio de penetração de cone in situ CPT*. Rio de Janeiro, 1991.
- ALAMANIS, N.; DAKOULAS, P. Simulation of random fields of soil properties by the local average subdivision method and engineering applications. *Energy Systems*, n. 12, p. 841–861, nov 2019.
- ALI, A. *et al.* Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modelled by infinite slopes. *Engineering Geology*, v. 179, p. 102–116, set. 2014.
- ASTM. *D5778-20: Standard test method for electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils*. West Conshohocken, 2020.
- BAECHER, G. B.; CHRISTIAN, J. T. *Reliability statistics in geotechnical engineering*. West Sussex: John Wiley and Sons Ltd., 2003. 605 p.
- BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. *Estatística para cursos de engenharia e informática*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- CAMI, B. *et al.* Scale of fluctuation for spatially varying soils: estimation methods and values. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, v. 6, n. 4, p. 03120002–1–03120002–16, dez. 2020.
- CAMPELLO, I. C. *Abordagem probabilística aplicada ao estudo da variabilidade geotécnica dos solos*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- CHEN, B. S. Y.; MAYNE, P. W. Statistical relationships between piezocone measurements and stress history of clays. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 33, n. 3, p. 488–498, 1996.
- COOLEY, J.; TUKEY, J. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comput.*, p. 297–301, 1965.
- CORDEIRO, R. F. *Avaliação do comportamento de aterro executado sobre depósito de argila mole na Rodovia BR-470 em Gaspar/SC*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- DELIGNETTE-MULLER, M. L.; DUTANG, C. fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions. *Journal of Statistical Software*, v. 64, n. 4, p. 1–34, 2015.
- DEVORE, J. *Probabilidade e Estatística: para engenharia e ciências*. São Paulo: Cengage Learning, 2006.
- DIENSTMANN, G.; CORDEIRO, R. F.; SAKAMOTO, M. Y. Compressibility and stability analysis of an embankment on soft soil: a case study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, v. 175, n. 6, p. 1–22, sep 2021.
- DNIT. *Mapa gerencial de Santa Catarina*. [S.l.], 2022.
- DYSON, A. P.; TOLOOIYAN, A. Optimisation of strength reduction finite element method codes for slope stability analysis. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 3, n. 1, abr. 2018.
- DYSON, A. P.; TOLOOIYAN, A. Probabilistic investigation of RFEM topologies for slope stability analysis. *Computers and Geotechnics*, v. 114, p. 103–129, out 2019.

- EL-RAMLY, H. *Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice*. Tese (Doctor of Philosophy) — University of Alberta, Edmond, Alberta, 2001.
- FENTON, G. A.; GRIFFITHS, D. V. *Risk assessment in geotechnical engineering*. Hoboken: John Wiley and Sons Ltd., 2008. ISBN 0470178205.
- FENTON, G. A.; VANMARCKE, E. H. Simulation of random fields via local average subdivision. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 116, n. 8, p. 1773–1749, ago. 1990.
- GRANDO, . *Propriedades e parâmetros geotécnicos de depósitos com argilas moles de Santa Catarina*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- GRIFFITHS, D. V.; HUANG, J.; FENTON, G. A. Influence of spatial variability on slope reliability using 2-D random fields. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 135, n. 10, p. 1367–1378, out. 2009.
- GUTJAHR, A.; BULLARD, B.; HATCH, S. General joint conditional simulations using a fast fourier transform method. *Mathematical Geology*, v. 29, n. 3, p. 361–389, 1997.
- HAVE, R. C. van der. *Random fields for non-linear finite element analysis of reinforced concrete*. Dissertação (Master in Structural Engineering) — Delft University of Technology, Netherlands, 2015.
- HOUMADI, Y. *et al.* Probabilistic analysis of consolidation problems using subset simulation. *Computers and Geotechnics*, v. 124, p. 103612, aug 2020.
- JHA, S. K.; CHING, J. Simplified reliability method for spatially variable undrained engineered slopes. *Soils and Foundations*, v. 53, n. 5, p. 708–719, oct 2013.
- JIANG, S.-H.; HUANG, J.-S. Efficient slope reliability analysis at low-probability levels in spatially variable soils. *Computers and Geotechnics*, v. 75, p. 18–27, may 2016.
- JIANG, S.-H.; PAPAIOANNOU, I.; STRAUB, D. Bayesian updating of slope reliability in spatially variable soils with in-situ measurements. *Engineering Geology*, v. 239, p. 310–320, may 2018.
- KENARSARI, A. E.; CHENARI, R. J.; ESLAMI, A. Characterization of the correlation structure of residual CPT profiles in sand deposits. *International Journal of Civil Engineering*, v. 11, n. 1, p. 29–37, 2013.
- KULHAWY, F.; MAYNE, P. W. *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Ithaca: Cornell University, 1990.
- LI, D.-Q. *et al.* Enhancement of random finite element method in reliability analysis and risk assessment of soil slopes using Subset Simulation. *Landslides*, v. 13, n. 2, p. 293–303, mar 2015.
- LIU, Y. *et al.* Advances in Gaussian random field generation: a review. *Computational Geosciences*, [S.L.], v. 23, n. 5, p. 1011–1047, aug 2019.
- LIU, Y. *et al.* Probabilistic stability analyses of undrained slopes by 3D random fields and finite element methods. *Geoscience Frontiers*, v. 9, n. 6, p. 1657–1664, nov 2018.
- LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. *Cone penetration testing in geotechnical practice*. London: Blackie Academic Professional, 1997.
- MAHMOUDI, E. *et al.* Stochastic field simulation of slope stability problems: Improvement and reduction of computational effort. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 369, p. 113167, sep 2020.

- MANTOGLIOU, A.; WILSON, J. L. The Turning Bands Method for simulation of random fields using line generation by a spectral method. *Water Resources Research*, Malden, v. 18, n. 5, p. 1379–1394, oct 1982.
- MARTON, M.; PENRIYA, W. *Modeling of random variations in soil properties*. Dissertação (Master in Civil Engineering) — School of Engineering and Science Aalborg University, Aalborg, 2015.
- MATHERON, G. The intrinsic random functions and their applications. *Adv. App. Prob.*, n. 5, p. 439–468, 1973.
- MELCHERS, R. E.; BECK, A. T. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. 3. ed. [S.l.]: WILEY, 2018.
- MULLER, M.-L. Delignette *et al.* *Help to fit of a parametric distribution to non-censored or censored data*. [S.l.], 2021.
- ORTIGÃO, J. A. R.; COLLET, H. B. Errors caused by friction in field vane testing. In: RICHARDS, A. F. (Ed.). *Vane shear strength testing in soils: field and laboratory studies*. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 1988. p. 104–116.
- OU-YANG, J.-Y. *et al.* A patching algorithm for conditional random fields in modeling material properties. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 377, p. 113719, apr 2021.
- PALOMINO-TAMAYO, J. L.; AWRUCH, A. M.; RODRÍGUEZ-CALDERÓN, W. Aplicación de campos estocásticos en problemas de geotecnia. *UIS Ingenierías*, v. 16, n. 2, p. 185–196, 2017.
- PERINI, L. *Caracterização da variabilidade de rejeitos de mineração de ouro e sua influência na análise do efeito da velocidade no ensaio CPTu*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2021.
- PHOON, K.; CHING, J. *Risk and reliability in geotechnical engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- PHOON, K.-K.; KULHAWY, F. H. Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 36, p. 612–624, 1999.
- ROBERTSON, P. K. Evaluating soil liquefaction and post-earthquake deformations using the CPT. *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, v. 27, n. 1, p. 151–158, 1990.
- ROBERTSON, P. K. Soil classification using the cone penetration test. In: *Int conf on site characterization*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 233–249.
- ROBERTSON, P. K.; WRIDE, C. E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 35, n. 3, p. 442–459, jun 1998.
- SALGADO, R.; PREZZI, M.; GANJU, E. *Assessment of site variability from analysis of cone penetration test data*. West Lafayette, IN: Purdue University, 2015.
- SANTAMARINA, J. C.; ALTSCHAEFFL, A. G.; CHAMEAU, J. L. Reliability of slopes: Incorporating qualitative information. *Transportation Research Record*, n. 1343, 1992.
- SCHNAID, F. *In situ testing in geomechanics - the main tests*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. *Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2012.

- SU, K.; LI, Y. Discussion of SRFEM with Mohr-Coulomb plasticity model in slope stability analysis. In: *2012 ASIA-PACIFIC POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE, 2012, Shanghai*. Proceedings. Shanghai: IEEE, 2012.
- UZIELLI, M. Non-deterministic interpretation and applications of CPT testing data. In: *Cone Penetration Testing 2022*. Boca Raton: CRC Press, 2022. p. 81–93.
- UZIELLI, M. *et al.* Soil variability analysis for geotechnical practice. *Characterization and engineering properties of natural soils 3-4*, p. 1653–1752, 2007. Taylor Francis Group London.
- VANMARCKE, E. *Random fields, analysis and synthesis*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1983.
- WANG, M.-Y. *et al.* Probabilistic stability analyses of multi-stage soil slopes by bivariate random fields and finite element methods. *Computers and Geotechnics*, v. 122, p. 103529, jun 2020.
- WHITMANN, R. V. Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 126, n. 7, p. 583–593, jul. 2000.
- ZHANG, J.-Z. *et al.* Hybrid machine learning model with random field and limited CPT data to quantify horizontal scale of fluctuation of soil spatial variability. *Acta Geotechnica*, v. 17, n. 4, p. 1129–1145, oct 2021.
- ZHU, H. *et al.* Undrained failure mechanisms of slopes in random soil. *Engineering Geology*, v. 191, p. 31–35, may 2015.

A Dados estatísticos sobre os pontos de investigação de CPTu

Neste Apêndice A, são apresentadas características gerais das propriedades do solo obtidas por meio de ensaio CPTU. Esses dados contribuem para caracterizar de forma geral a área de estudo. As informações foram organizadas em tabelas que contêm os valores de mínimo, máximo, média e desvio padrão das leituras de q_c , q_t , f_s e Δu . Este último parâmetro refere-se à variação entre u_2 e a pressão hidrostática. Nesse contexto de caracterização, são apresentadas a seguir a Tabela 24, com dados de resistência de ponta (q_c), a Tabela 25, com dados da resistência real mobilizada (q_t), a Tabela 26, com atrito lateral (f_s) e a Tabela 27, com a variação da poropressão (Δu).

Tabela 24: Parâmetros estatísticos da resistência de ponta (q_c).

Pto. Investigação	Mínimo (kPa)	Máximo (kPa)	Média (kPa)	Desv. Pad. (kPa)
PI1	0	16.350	1.209	1.768
PI2	0	27.420	2.432	3.660
PI3	0	48.250	1.061	2.731
PI4	0	12.310	794	1.263
PI5	0	10.760	1.462	2.365
PI6	0	21.330	3.808	4.510
PI7	0	10.110	1.386	1.974
PI8	10	22.590	985	1.982
PI9	0	18.800	1.777	2.515
PI10	0	20.460	675	1.953
PI11	0	7.910	768	1.099
PI12	0	21.310	797	2.068
PI13	0	12.270	1.984	1.747
PI14	20	20.180	1.804	2.687
PI15	0	21.430	2.180	2.992
PI16	30	29.010	3.380	2.810
PI17	30	22.730	1.001	1.834
PI18	0	21.620	474	1.306
PI19	0	20.830	1.026	1.742
PI20	0	9.430	1.147	1.173
PI21	0	12.320	2.338	2.505
PI22	0	10.350	2.305	1.917

Tabela 24 Parâmetros estatísticos da resistência de ponta (q_c). (Conclusão)

Pto. Investigação	Mínimo (kPa)	Máximo (kPa)	Média (kPa)	Desv. Pad. (kPa)
PI23	0	17.220	922	1.924
PI24	0	20.210	1.144	2.046

Tabela 25: Parâmetros estatísticos da resistência real mobilizada no ensaio (q_t).

Pto. Investigação	Mínimo (kPa)	Máximo (kPa)	Média (kPa)	Desv. Pad. (kPa)
PI1	0	16.474	1.316	1.776
PI2	0	27.536	2.464	3.663
PI3	0	48.350	1.166	2.745
PI4	0	12.565	924	1.282
PI5	0	10.819	1.535	2.361
PI6	0	21.444	3.880	4.510
PI7	0	10.161	1.498	1.972
PI8	10	22.663	1.027	1.979
PI9	0	18.916	1.834	2.519
PI10	0	20.522	726	1.954
PI11	-17	8.009	822	1.095
PI12	0	21.386	892	2.069
PI13	0	12.531	2.057	1.749
PI14	24	20.245	1.901	2.678
PI15	0	21.651	2.284	2.963
PI16	30	29.061	3.529	2.764
PI17	30	22.897	1.126	1.824
PI18	0	21.718	559	1.326
PI19	0	20.891	1.072	1.741
PI20	0	9.549	1.229	1.182
PI21	0	12.517	2.438	2.538
PI22	0	10.426	2.330	1.908
PI23	0	17.247	1.007	1.931
PI24	0	20.225	1.213	2.033

Tabela 26: Parâmetros estatísticos do atrito lateral (f_s).

Pto. Investigação	Mínimo (kPa)	Máximo (kPa)	Média (kPa)	Desv. Pad. (kPa)
PI1	0	120	16	14
PI2	0	285	74	79
PI3	0	140	19	22
PI4	0	187	15	15
PI5	0	125	20	19
PI6	5	185	27	26
PI7	0	197	34	38
PI8	0	397	30	51
PI9	0	731	60	115
PI10	0	186	18	21
PI11	0	388	27	50
PI12	0	733	25	77
PI13	0	158	41	24
PI14	0	133	13	18
PI15	0	982	23	77
PI16	0	212	44	33
PI17	15	204	29	22
PI18	0	54	15	7
PI19	0	187	15	15
PI20	0	143	28	18
PI21	0	521	55	77
PI22	0	460	112	102
PI23	0	964	36	80
PI24	0	591	37	69

Tabela 27: Parâmetros estatísticos da variação de poropressão (Δu).

Pto. Investigação	Mínimo (kPa)	Máximo (kPa)	Média (kPa)	Desv. Pad. (kPa)
PI1	-269	1.002	255	221
PI2	-193	450	89	97
PI3	-242	663	100	134
PI4	-318	668	205	155
PI5	-417	954	84	239

Tabela 27 Parâmetros estatísticos da variação de poropressão (Δu).

Pto. Investigação	Mínimo (kPa)	Máximo (kPa)	Média (kPa)	Desv. Pad. (kPa)
PI6	-355	1.373	182	233
PI7	-341	830	219	224
PI8	-281	1.774	385	521
PI9	-46	1.268	296	148
PI10	-24	1.629	178	154
PI11	-257	445	67	122
PI12	-232	1.046	18	138
PI13	-405	722	117	189
PI14	-320	2.128	207	367
PI15	-211	510	20	157
PI16	-241	1.076	212	223
PI17	-205	541	165	200
PI18	-42	976	244	249
PI19	-250	779	299	140
PI20	-329	773	119	158
PI21	-372	670	81	150
PI22	-212	1.229	269	275
PI23	-199	574	77	117
PI24	-281	912	95	176

B *Script* para adequação do campo aleatório criado no RFEM para o Abaqus

```
1  '''
2  Funcao para processamento das informacoes do field obtido no software RFEM de
3  Fenton e Griffiths.
4  Os arquivos resultantes estao prontos para serem importados no Abaqus.
5  '''
6
7  import pandas as pd
8  import numpy as np
9  import matplotlib.pyplot as plt
10 import pyautogui, sys
11 import time
12
13 #DADOS DE ENTRADA
14 #posicao botao RUN RFEM FENTON
15 #implementar posicao automatica do mouse
16 #https://stackoverflow.com/questions/23979184/how-to-know-if-a-user-has-pressed-the-enter-key-
17
18 x_mouse = 182
19 y_mouse = 190
20
21 #posicao campo seed
22 x_seed = 281
23 y_seed = 722
24
25 #informacoes de entrada do fenton
26 media_lognormal = 25.97
27 desviop_lognormal = 1.87
28
29 #Dados do campo randomico gerado
30 nome_arquivo = 'br470.fld'
31 nome_arquivo_stt = 'br470.stt'
32 nome_arquivo_fsd = 'br470.fsd' #informacao se rompe ou nao
33 quantidadeCampos = 5000
34 seed_inicial = 10200
```

```

34 y = 22 #altura do campo
35 x = 76.8 #base do campo
36
37 #####
38 variancia_normal = np.log(1+(desviop_lognormal/media_lognormal)**2)
39 media_normal = np.log(media_lognormal)-(0.5*variancia_normal)
40
41 def processa_fld(nome_arquivo, y, x, qtd):
42     #Leitura do arquivo do Field exportado no software RFEM
43     df_fld = pd.read_csv(nome_arquivo, sep='□', skiprows=10, header=None)
44
45     seed = pd.read_csv(nome_arquivo_stt, header=None, skiprows=6,
46         error_bad_lines=False).iloc[0][1].split('□')[-1]
47
48     if len(pd.read_csv(nome_arquivo_fsd))>0:
49         rompe = 1
50     else:
51         rompe = 0
52
53     #Armazena dados do tamanho do Field
54     n_columns = int(list(df_fld.iloc[0].dropna())[0])
55     n_lines = int(list(df_fld.iloc[0].dropna())[1])
56
57     #Armazena valores do campo em uma lista
58     np_fld = df_fld.iloc[1:].values
59     list_fld = np_fld[~np.isnan(np_fld)].tolist()
60
61     #Cria lista das coordenadas
62     l_x = list(np.linspace(0, x, num=n_columns))*n_lines
63     l_y = np.repeat(np.linspace(y, 0, num=n_lines), n_columns)
64
65     #Cria tabela final
66     df_fld_final = pd.DataFrame()
67
68     df_fld_final = pd.DataFrame()
69     df_fld_final['coesao'] = list_fld

```

```

70     df_fld_final['coesao'] = np.exp(media_normal + ((df_fld_final['coesao']) *
71         (variancia_normal**0.5)))
72     df_fld_final['deformacao'] = 0
73     df_fld_final['field_1_X'] = 1_x
74     df_fld_final['field_2_Y'] = 1_y
75
76     #Exporta tabela
77     mean = df_fld_final['coesao'].mean()
78     std = df_fld_final['coesao'].std()
79
80     df_fld_final.to_csv('FLD_br470/' + str(qtd) + '_' + nome_arquivo +
81         '_processado.csv', sep='\t', decimal='.', index=False)
82
83     return(mean, std, seed, rompe)
84
85     #A partir daqui e a geracao de uma tabela em .csv para criacao de um arquivo
86     #resumo dos dados do processamento do RFEM e dados dos campos - media, desvio
87     #padrao, seed e se rompe
88
89     mean = []
90     std = []
91     seed = []
92     rompe = []
93
94     for i in range(quantidadeCampos):
95         print('Field' + str(i) + ' processado!')
96         pyautogui.click(clicks=2, x=x_seed, y=y_seed)
97         pyautogui.press('backspace')
98         pyautogui.typewrite(str(seed_inicial + i))
99         pyautogui.click(x=x_mouse, y=y_mouse)
100        time.sleep(5)
101        m, s, se, r = processa_fld(nome_arquivo, y, x, i)
102        time.sleep(2)
103        mean.append(m)
104        std.append(s)
105        seed.append(se)
106        rompe.append(r)

```

```
104 df_mean = pd.DataFrame()
105 df_mean['mean'] = mean
106 df_mean['std'] = std
107 df_mean['seed'] = seed
108 df_mean['rompe'] = rompe
109
110 df_mean.to_csv('FLD_br470/estatistica_campos.csv', sep=';', decimal=',',
                index=False)
```

C Script para cálculo do FS para o campo aleatório

```
1 '''
2 Funcao para criacao de tabela com FS.
3 Os arquivos resultantes estao prontos para serem importados no Abaqus.
4 '''
5
6 import pandas as pd
7
8 l_fs = [1.0, 2.5] '''valores atribuidos ao fator de seguranca: 1 e 2,5'''
9
10 arquivo = 'parte_nome_arquivo_que_repete.csv' '''no inicio do nome do arquivo
11     foi colocada uma numeracao para rastreio. inicio em 0 e fim em 4999'''
12
13 i = 0
14 f = 4999
15
16 while i <= f:
17     print(i)
18     campo = pd.read_csv(str(i) + '_' + arquivo, sep='\t', decimal='.')
19
20     df_fld_final = pd.DataFrame()
21     for fs in l_fs:
22
23         df_fld_fs = pd.DataFrame()
24         df_fld_fs['coesao'] = campo['coesao']/fs
25         df_fld_fs['deformacao'] = 0
26         df_fld_fs['field_1_X'] = campo['field_1_X']
27         df_fld_fs['field_2_Y'] = campo['field_2_Y']
28         df_fld_fs['field_3_FS'] = fs
29
30         df_fld_final = pd.concat([df_fld_final, df_fld_fs])
31
32     df_fld_final.to_csv('comFS/' + str(i) + '_' + arquivo + '_comFS.csv',
33         sep='\t', decimal='.', index=False)
34
35     i+=1
```

D Sub-rotina para indicação das coordenadas do campo aleatório

```
1      SUBROUTINE USDFLD(FIELD, STATEV, PNEWDT, DIRECT, T, CELENT, TIME, DTIME,
2      1CMNAME, ORNAME, NFIELD, NSTATV, NOEL, NPT, LAYER, KSPT, KSTEP, KINC, NDI,
3      2NSHR, COORD, JMAC, JMATYP, MATLAYO, LACCFLA)
4      C
5      INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
6      C
7      CHARACTER*80 CMNAME, ORNAME
8      CHARACTER*3 FLGRAY(15)
9      DIMENSION FIELD(NFIELD), STATEV(NSTATV), DIRECT(3,3), T(3,3), TIME(2)
10     DIMENSION ARRAY(15), JARRAY(15), JMAC(*), JMATYP(*), COORD(*)
11
12     x=COORD(1)
13     y=COORD(2)
14     z=COORD(3)
15     FIELD(1)=x
16     FIELD(2)=y
17     RETURN
18     END
```

E Esquema de alteração das *keywords* no Abaqus

[1] MATERIAL PARAMETERS

[2] INITIAL CONDITIONS

*initial conditions, type=field, variable=1

NSET NAME, Field Variable Minimum Value

[3] FIELD VARIABLE CONTROLLING IN “*STEP PART”

*STEP

...

*field, variable=1

Node set Name, Field Variable Minimum Value

...

*END STEP

*STEP

...

*field, variable=1

Node set Name, Field Variable Maximum Value

...

*END STEP

F *Script* de simulação do modelo do estudo de caso no Abaqus

```
1 '''
2 Script criado a partir da macro do Abaqus para o estudo de caso. Foi alterado
   para colocar os campos aleatorios como input e para rodar em loop.
3 Nao cria arquivos de saida, apenas salva todos os arquivos na pasta indicada e,
   posteriormente deve ser rodado o script de posprocessamento.
4 '''
5
6 # -*- coding: mbcs -*-
7 # Do not delete the following import lines
8 from abaqus import *
9 from abaqusConstants import *
10 import __main__
11 import section
12 import regionToolset
13 import displayGroupMdbToolset as dgm
14 import part
15 import material
16 import assembly
17 import step
18 import interaction
19 import load
20 import mesh
21 import optimization
22 import job
23 import sketch
24 import visualization
25 import xyPlot
26 import displayGroupOdbToolset as dgo
27 import connectorBehavior
28 #Imports para odb
29 from odbAccess import openOdb
30 import odbAccess
31 #Outros imports
32 import csv
```

```

33 import os
34 import time
35
36 os.chdir(r"diretorio_onde_sao_salvos_arquivos")
37
38 diretorio_parametros_resistencia = r"diretorio_onde_estao_salvos_campos"
39 subrotina = r"C:\\diretorio\\randomfield.for"
40
41 inicial = 0
42 fim = 4999
43
44 modelAtual = 'Model-'+str(inicial)
45 mdb.Model(name=modelAtual, modelType=STANDARD_EXPLICIT)
46 del mdb.models['Model-1']
47
48 while inicial<=fim:
49
50     start_time = time.clock()
51
52     arquivo_resistencia = diretorio_parametros_resistencia + str(inicial) +
53         '_br470.csv'
54
55     fld_resistencia = []
56     with open(arquivo_resistencia) as csvfile:
57         spamreader = csv.reader(csvfile, delimiter='\t')
58         next(spamreader)
59         for row in spamreader:
60             row = [float(i) for i in row]
61             fld_resistencia.append(row)
62
63     fld_resistencia = tuple(tuple(sub) for sub in fld_resistencia)
64
65     s = mdb.models[modelAtual].ConstrainedSketch(name='__profile__',
66         sheetSize=200.0)
67     g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
68     s.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
69     s.Spot(point=(0.0, 0.0))
70     s.Spot(point=(0.0, 22.0))

```

```

70     s.Spot(point=(4.6, 22.0))
71     s.Spot(point=(8.1, 23.6))
72     s.Spot(point=(18.6, 23.6))
73     s.Spot(point=(22.6, 22.7))
74     s.Spot(point=(27.6, 26.1))
75     s.Spot(point=(38.0, 26.1))
76     s.Spot(point=(41.0, 23.8))
77     s.Spot(point=(51.1, 23.8))
78     s.Spot(point=(54.7, 22.0))
79     s.Spot(point=(76.8, 22.0))
80     s.Spot(point=(76.8, 0.0))
81     session.viewports['Viewport:1'].view.fitView()
82     s.Line(point1=(0.0, 0.0), point2=(0.0, 22.0))
83     s.VerticalConstraint(entity=g[2], addUndoState=False)
84     s.Line(point1=(0.0, 22.0), point2=(4.6, 22.0))
85     s.HorizontalConstraint(entity=g[3], addUndoState=False)
86     s.PerpendicularConstraint(entity1=g[2], entity2=g[3], addUndoState=False)
87     s.Line(point1=(4.6, 22.0), point2=(8.1, 23.6))
88     s.Line(point1=(8.1, 23.6), point2=(18.6, 23.6))
89     s.HorizontalConstraint(entity=g[5], addUndoState=False)
90     s.Line(point1=(18.6, 23.6), point2=(22.6, 22.7))
91     s.Line(point1=(22.6, 22.7), point2=(27.6, 26.1))
92     s.Line(point1=(27.6, 26.1), point2=(38.0, 26.1))
93     s.HorizontalConstraint(entity=g[8], addUndoState=False)
94     s.Line(point1=(38.0, 26.1), point2=(41.0, 23.8))
95     s.Line(point1=(41.0, 23.8), point2=(51.1, 23.8))
96     s.HorizontalConstraint(entity=g[10], addUndoState=False)
97     s.Line(point1=(51.1, 23.8), point2=(54.7, 22.0))
98     s.Line(point1=(54.7, 22.0), point2=(76.8, 22.0))
99     s.HorizontalConstraint(entity=g[12], addUndoState=False)
100    s.Line(point1=(76.8, 22.0), point2=(76.8, 0.0))
101    s.VerticalConstraint(entity=g[13], addUndoState=False)
102    s.PerpendicularConstraint(entity1=g[12], entity2=g[13], addUndoState=False)
103    s.Line(point1=(76.8, 0.0), point2=(0.0, 0.0))
104    s.HorizontalConstraint(entity=g[14], addUndoState=False)
105    s.PerpendicularConstraint(entity1=g[13], entity2=g[14], addUndoState=False)
106    p = mdb.models[modelAtual].Part(name='Part-1', dimensionality=TWO_D_PLANAR,
107        type=DEFORMABLE_BODY)

```

```

108 p = mdb.models[modelAtual].parts['Part-1']
109 p.BaseShell(sketch=s)
110 s.unsetPrimaryObject()
111 p = mdb.models[modelAtual].parts['Part-1']
112 session.viewports['Viewport:1'].setValues(displayedObject=p)
113 del mdb.models[modelAtual].sketches['__profile__']
114 p = mdb.models[modelAtual].parts['Part-1']
115 f, e, d1 = p.faces, p.edges, p.datums
116 t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[0], sketchPlaneSide=SIDE1, origin=(
117     37.960127, 11.752853, 0.0))
118 s1 = mdb.models[modelAtual].ConstrainedSketch(name='__profile__',
119     sheetSize=162.22, gridSpacing=4.05, transform=t)
120 g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
121 s1.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
122 p = mdb.models[modelAtual].parts['Part-1']
123 p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, filter=COPLANAR_EDGES)
124 s1.Line(point1=(-33.360127, 10.247147), point2=(16.739873, 10.247147))
125 s1.HorizontalConstraint(entity=g[15], addUndoState=False)
126 p = mdb.models[modelAtual].parts['Part-1']
127 f = p.faces
128 pickedFaces = f.getSequenceFromMask(mask=('#11', ), )
129 e1, d2 = p.edges, p.datums
130 p.PartitionFaceBySketch(faces=pickedFaces, sketch=s1)
131 s1.unsetPrimaryObject()
132 del mdb.models[modelAtual].sketches['__profile__']
133 session.viewports['Viewport:1'].partDisplay.setValues(sectionAssignments=ON,
134     engineeringFeatures=ON)
135 session.viewports['Viewport:1'].partDisplay.geometryOptions.setValues(
136     referenceRepresentation=OFF)
137 mdb.models[modelAtual].Material(name='Aterro')
138 mdb.models[modelAtual].materials['Aterro'].Elastic(table=((25000.0, 0.3), ))
139 mdb.models[modelAtual].materials['Aterro'].MohrCoulombPlasticity(table=((35.0,
140     0.0), ))
141 mdb.models[modelAtual].materials['Aterro'].mohrCoulombPlasticity.MohrCoulombHardening(
142     table=((5.0, 0.0), ))
143 mdb.models[modelAtual].materials['Aterro'].mohrCoulombPlasticity.TensionCutOff(
144     temperatureDependency=OFF, dependencies=0, table=((0.0, 0.0), ))
145 mdb.models[modelAtual].materials['Aterro'].Permeability(specificWeight=10.0,

```

```

146         inertialDragCoefficient=0.142887, table=((1.0, 1.0), ))
147     mdb.models[modelAtual].Material(name='Fundacao')
148     mdb.models[modelAtual].materials['Fundacao'].Depvar(n=1)
149     mdb.models[modelAtual].materials['Fundacao'].UserDefinedField()
150     mdb.models[modelAtual].materials['Fundacao'].Elastic(table=((1300.0, 0.45),
151         ))
152     mdb.models[modelAtual].materials['Fundacao'].MohrCoulombPlasticity(table=((0.0,
153         0.0), ))
154     mdb.models[modelAtual].materials['Fundacao'].mohrCoulombPlasticity.MohrCoulombHardeni
155         dependencies=3, table=fld_resistencia)
156     mdb.models[modelAtual].materials['Fundacao'].mohrCoulombPlasticity.TensionCutOff(
157         temperatureDependency=OFF, dependencies=0, table=((0.0, 0.0), ))
158     mdb.models[modelAtual].materials['Fundacao'].Permeability(specificWeight=10.0,
159         inertialDragCoefficient=0.142887, table=((1.0, 1.0), ))
160     mdb.models[modelAtual].HomogeneousSolidSection(name='Section-1',
161         material='Aterro', thickness=None)
162     mdb.models[modelAtual].HomogeneousSolidSection(name='Section-2',
163         material='Fundacao', thickness=None)
164     p = mdb.models[modelAtual].parts['Part-1']
165     f = p.faces
166     faces = f.getSequenceFromMask(mask=(' [#2_]', ), )
167     region = p.Set(faces=faces, name='Set-1')
168     p = mdb.models[modelAtual].parts['Part-1']
169     p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Section-1', offset=0.0,
170         offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField='',
171         thicknessAssignment=FROM_SECTION)
172     p = mdb.models[modelAtual].parts['Part-1']
173     f = p.faces
174     faces = f.getSequenceFromMask(mask=(' [#1_]', ), )
175     region = p.Set(faces=faces, name='Set-2')
176     p = mdb.models[modelAtual].parts['Part-1']
177     p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Section-2', offset=0.0,
178         offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField='',
179         thicknessAssignment=FROM_SECTION)
180     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
181     session.viewports['Viewport:1'].setValues(displayedObject=a)
182     session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(
183         optimizationTasks=OFF, geometricRestrictions=OFF, stopConditions=OFF)

```

```

183     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
184     a.DatumCsysByDefault(CARTESIAN)
185     p = mdb.models[modelAtual].parts['Part-1']
186     a.Instance(name='Part-1-1', part=p, dependent=OFF)
187     session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=ON)
188     session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
189         meshTechnique=ON)
190     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
191     f1 = a.instances['Part-1-1'].faces
192     pickedRegions = f1.getSequenceFromMask(mask=('[#2_]', ), )
193     a.setMeshControls(regions=pickedRegions, elemShape=QUAD)
194     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
195     f1 = a.instances['Part-1-1'].faces
196     pickedRegions = f1.getSequenceFromMask(mask=('[#1_]', ), )
197     a.setMeshControls(regions=pickedRegions, elemShape=QUAD,
198         technique=STRUCTURED)
199     elemType1 = mesh.ElemType(elemCode=CPE4P, elemLibrary=STANDARD)
200     elemType2 = mesh.ElemType(elemCode=UNKNOWN_TRI, elemLibrary=STANDARD)
201     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
202     f1 = a.instances['Part-1-1'].faces
203     faces1 = f1.getSequenceFromMask(mask=('[#3_]', ), )
204     pickedRegions =(faces1, )
205     a.setElementType(regions=pickedRegions, elemTypes=(elemType1, elemType2))
206     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
207     partInstances =(a.instances['Part-1-1'], )
208     a.seedPartInstance(regions=partInstances, size=1.0, deviationFactor=0.1,
209         minSizeFactor=0.1)
210     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
211     partInstances =(a.instances['Part-1-1'], )
212     a.generateMesh(regions=partInstances)
213     session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(mesh=OFF,
214         loads=ON,
215         bcs=ON, predefinedFields=ON, connectors=ON)
216     session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
217         meshTechnique=OFF)
218     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
219     e1 = a.instances['Part-1-1'].edges
220     edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#4_]', ), )

```

```

219     region = a.Set(edges=edges1, name='Set-4')
220     mdb.models[modelAtual].DisplacementBC(name='BC-1', createStepName='Initial',
221     region=region, u1=SET, u2=UNSET, ur3=UNSET, amplitude=UNSET,
222     distributionType=UNIFORM, fieldName='', localCsys=None)
223     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
224     e1 = a.instances['Part-1-1'].edges
225     edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=( '#10_[]' , ), )
226     region = a.Set(edges=edges1, name='Set-5')
227     mdb.models[modelAtual].DisplacementBC(name='BC-2', createStepName='Initial',
228     region=region, u1=SET, u2=UNSET, ur3=UNSET, amplitude=UNSET,
229     distributionType=UNIFORM, fieldName='', localCsys=None)
230     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
231     e1 = a.instances['Part-1-1'].edges
232     edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=( '#8_[]' , ), )
233     region = a.Set(edges=edges1, name='Set-6')
234     mdb.models[modelAtual].DisplacementBC(name='BC-3', createStepName='Initial',
235     region=region, u1=SET, u2=SET, ur3=UNSET, amplitude=UNSET,
236     distributionType=UNIFORM, fieldName='', localCsys=None)
237     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
238     e1 = a.instances['Part-1-1'].edges
239     edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=( '#8_[]' , ), )
240     region = a.Set(edges=edges1, name='Set-7')
241     mdb.models[modelAtual].PorePressureBC(name='BC-4', createStepName='Initial',
242     region=region, distributionType=UNIFORM, fieldName='', magnitude=0.0)
243     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
244     e1 = a.instances['Part-1-1'].edges
245     edges1 = e1.getSequenceFromMask(mask=( '#1_[]' , ), )
246     region = a.Set(edges=edges1, name='Set-8')
247     mdb.models[modelAtual].PorePressureBC(name='BC-5', createStepName='Initial',
248     region=region, distributionType=UNIFORM, fieldName='', magnitude=0.0)
249     a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
250     f1 = a.instances['Part-1-1'].faces
251     faces1 = f1.getSequenceFromMask(mask=( '#3_[]' , ), )
252     region = a.Set(faces=faces1, name='Set-9')
253     mdb.models[modelAtual].VoidsRatio(name='Predefined_[]Field-1', region=region,
254     voidsRatio1=1.0, distributionType=UNIFORM, variation=CONSTANT_RATIO)
255     session.viewports['Viewport:[]1'].assemblyDisplay.setValues(loads=OFF,
     bcs=OFF,

```

```

256     predefinedFields=OFF, connectors=OFF, adaptiveMeshConstraints=ON)
257 mdb.models[modelAtual].GeostaticStep(name='geostatico', previous='Initial',
258     timeIncrementationMethod=AUTOMATIC, minInc=1e-05, maxInc=1.0,
259     utol=1e-05)
260 session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(
261     step='geostatico')
262 session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(loads=ON, bcs=ON,
263     predefinedFields=ON, connectors=ON, adaptiveMeshConstraints=OFF)
264 a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
265 f1 = a.instances['Part-1-1'].faces
266 faces1 = f1.getSequenceFromMask(mask=( '#1' ), )
267 region = a.Set(faces=faces1, name='Set-10')
268 mdb.models[modelAtual].BodyForce(name='Load-1', createStepName='geostatico',
269     region=region, comp2=-16.0)
270 session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(loads=OFF,
271     bcs=OFF,
272     predefinedFields=OFF, connectors=OFF, adaptiveMeshConstraints=ON)
273 mdb.models[modelAtual].SoilsStep(name='soils', previous='geostatico',
274     response=STEADY_STATE, creep=OFF, initialInc=1e-05, minInc=1e-10,
275     end=None, utol=None, cetol=None, amplitude=RAMP)
276 session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(step='soils')
277 session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(loads=ON, bcs=ON,
278     predefinedFields=ON, connectors=ON, adaptiveMeshConstraints=OFF)
279 a = mdb.models[modelAtual].rootAssembly
280 f1 = a.instances['Part-1-1'].faces
281 faces1 = f1.getSequenceFromMask(mask=( '#2' ), )
282 region = a.Set(faces=faces1, name='Set-11')
283 mdb.models[modelAtual].BodyForce(name='Load-2', createStepName='soils',
284     region=region, comp2=-20.0)
285 session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(loads=OFF,
286     bcs=OFF,
287     predefinedFields=OFF, connectors=OFF, adaptiveMeshConstraints=ON)
288 mdb.models[modelAtual].SoilsStep(name='FS', previous='soils',
289     response=STEADY_STATE, creep=OFF, initialInc=1e-05, minInc=1e-10,
290     end=None, utol=None, cetol=None, amplitude=RAMP)
291 session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(step='FS')
292 session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(step='geostatico')
293 mdb.models[modelAtual].fieldOutputRequests['F-Output-1'].setValues(variables=(

```

```

292         'PEEQ', 'U', 'FV'))
293
294     mdb.models[modelAtual].keywordBlock.synchVersions(storeNodesAndElements=False)
295     mdb.models[modelAtual].keywordBlock.replace(62, """
296     *Initial Conditions, TYPE=RATIO
297     Set-9, 1.
298     *Initial Conditions, TYPE=Field, variable=3
299     Set-9, 1.0""")
300     mdb.models[modelAtual].keywordBlock.replace(94, """
301     **
302     *field, variable=3
303     Set-9, 2.5
304     ** OUTPUT REQUESTS
305     **""")
306     session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(
307         adaptiveMeshConstraints=OFF)
308
309     #mudar o nome do job
310     job_name = str(inicial) + '_estudocaso'
311     job = mdb.Job(name=job_name, model=modelAtual, description='', type=ANALYSIS,
312         atTime=None, waitMinutes=0, waitHours=0, queue=None, memory=90,
313         memoryUnits=PERCENTAGE, getMemoryFromAnalysis=True,
314         explicitPrecision=SINGLE, nodalOutputPrecision=SINGLE, echoPrint=OFF,
315         modelPrint=OFF, contactPrint=OFF, historyPrint=OFF,
316         userSubroutine=subrotina, scratch='', multiprocessingMode=DEFAULT,
317         numCpus=1, numGPUs=0)
318     try:
319         job.submit(consistencyChecking=OFF)
320         job.waitForCompletion()
321     except AbaqusException, message:
322         None
323
324     tempo = time.clock() - start_time
325
326     print('Modelo processado' + str(inicial) + '-' + str(tempo) + "
327         segundos")
328
329     modelAtual = 'Model-' + str(inicial+1)

```

```
328     mdb.Model(name=modelAtual, modelType=STANDARD_EXPLICIT)
329     del mdb.models['Model-' + str(inicial)]
330
331     inicial+=1
```

G *Script* para obtenção dos valores dos *outputs* desejados com processamento dentro do Abaqus

```
1  '''
2  Funcao para leitura dos arquivos de output do abaqus. Deve ser copiado e colado
   dentro do abaqus.
3  O arquivo resultante e uma tabela com os valores para os outputs desejados.
4  '''
5
6  from abaqus import *
7  from abaqusConstants import *
8  import __main__
9  import section
10 import regionToolset
11 import displayGroupMdbToolset as dgm
12 import part
13 import material
14 import assembly
15 import step
16 import interaction
17 import load
18 import mesh
19 import optimization
20 import job
21 import sketch
22 import visualization
23 import xyPlot
24 import displayGroupOdbToolset as dgo
25 import connectorBehavior
26 #Imports para odb
27 from odbAccess import openOdb
28 import odbAccess
29 #Outros imports
30 import csv
31 import os
32 import time
33
```

```

34 os.chdir(r"diretorio_onde_sera_salvo_arquivo_resultado")
35
36 resultado = open('resultado_modelos.csv' , 'w')
37 resultado.write('modelo;U;PEEQ;FS\n') #U, PEEQ, FS foram os resultados
    necessarios na analise
38
39 inicial = 0
40 fim = 4999
41 while inicial<=fim:
42
43     job_name = str(inicial) + '_estudocaso'#nome do job salvo
44
45     #Lendo ODB
46     odb=openOdb(job_name + '.odb')
47     ultimo_frame = odb.steps['FS'].frames[-1]
48
49     #U
50     U_points = ultimo_frame.fieldOutputs['U'].values
51     list_U = []
52     for q in range (len(U_points)):
53         list_U.append(U_points[q].magnitude)
54     U_max = max(list_U)
55
56     #PEEQ
57     PEEQ_points = ultimo_frame.fieldOutputs['PEEQ'].values
58     list_PEEQ = []
59     for q in range (len(PEEQ_points)):
60         list_PEEQ.append(PEEQ_points[q].data)
61     PEEQ_max = max(list_PEEQ)
62
63     #FS
64     FS = ultimo_frame.fieldOutputs['FV3'].values[0].data
65     resultado.write(str(inicial)+';' +str(U_max)+ ';' + str(PEEQ_max)+ ';' +
        str(FS) +'\n')
66
67     odb.close()
68     inicial+=1
69 resultado.close()

```

H *Script* para obtenção da informação de falha

```
1 '''
2 Funcao para leitura de arquivos texto ".sta" (abaqus) de identificacao de
3 rompimento do talude.
4 O arquivo resultante e uma tabela com indicacao de completude (nao falha) ou nao
5 completude (falha).
6 '''
7
8 import csv
9 import os
10
11 os.chdir(r"insercão do diretório onde o arquivo será salvo")
12
13 diretorio_arquivos_sta = "insercão do diretório dos arquivos sta"
14 lista_arquivos_sta = os.listdir("insercão do diretório dos arquivos sta para
15 criação de uma lista")
16 sta_arquivos = [arq for arq in lista_arquivos_sta if
17 arq.lower().endswith(".sta")]
18
19 resultado = open('resultado_2.csv' , 'w') #nome do arquivo csv onde sera salva a
20 tabela com informacao se o talude rompe ou nao rompe
21 resultado.write('modelo;rompe\n')
22
23 inicio = 0
24
25 for r in range(len(sta_arquivos)):
26     ler_arquivo = open(diretorio_arquivos_sta + str(inicio) + "nome_arquivo.sta")
27     conteudo = ler_arquivo.readlines()
28     rompe = conteudo[-1]
29     resultado.write(str(inicio) + ';' + rompe)
30
31     inicio = inicio + 1
32
33 resultado.close()
```

I Gráficos de autocorrelação para valores residuais

Neste Apêndice I são apresentados os gráficos de autocorrelação para os valores residuais, ou seja, para os valores com remoção de tendência, para os parâmetros de q_c , q_t , f_s e S_u . Os gráficos são identificados na Figura 58, Figura 59, Figura 60 e Figura 61, respectivamente.

Figura 58: Autocorrelação dos dados de q_c residual pela distância de separação vertical.

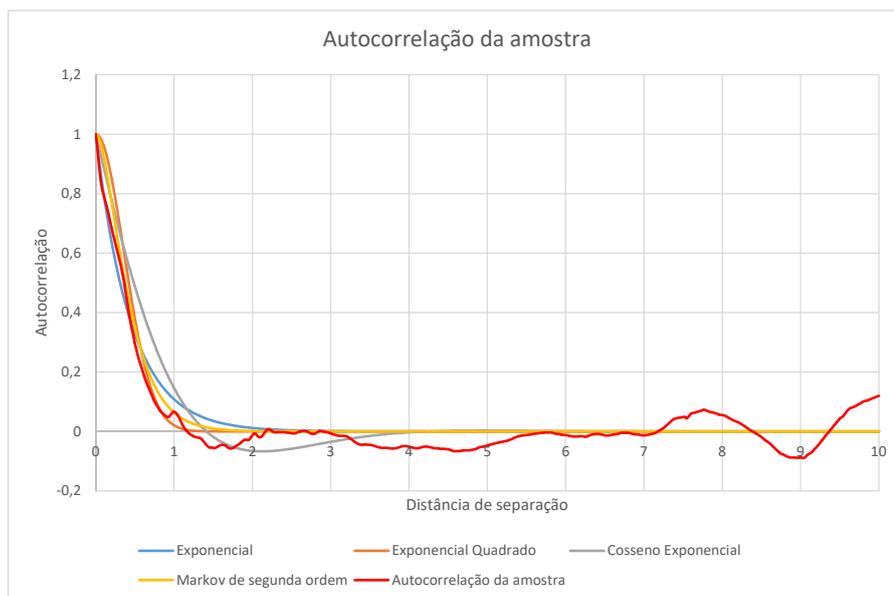


Figura 59: Autocorrelação dos dados de q_t residual pela distância de separação vertical.

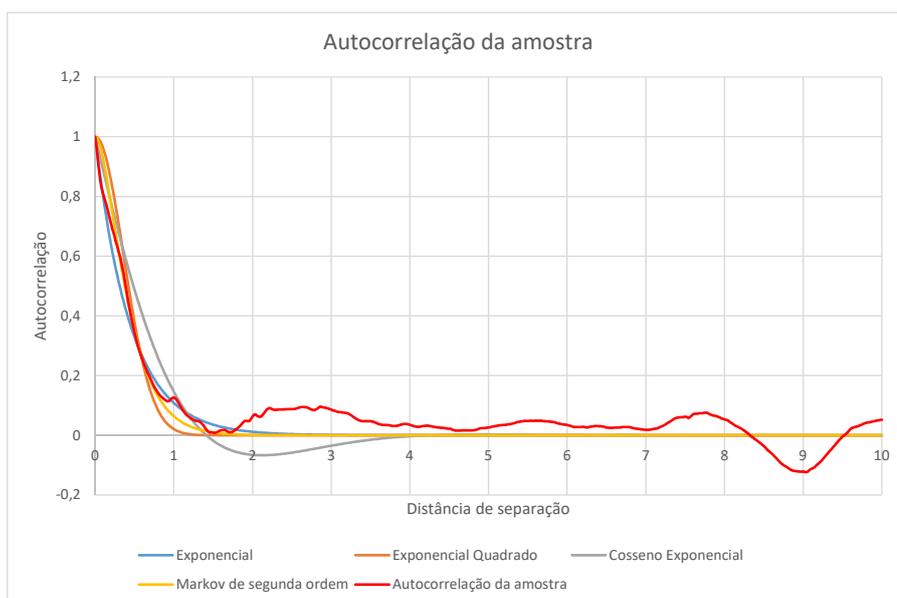


Figura 60: Autocorrelação dos dados de f_s residual pela distância de separação vertical.

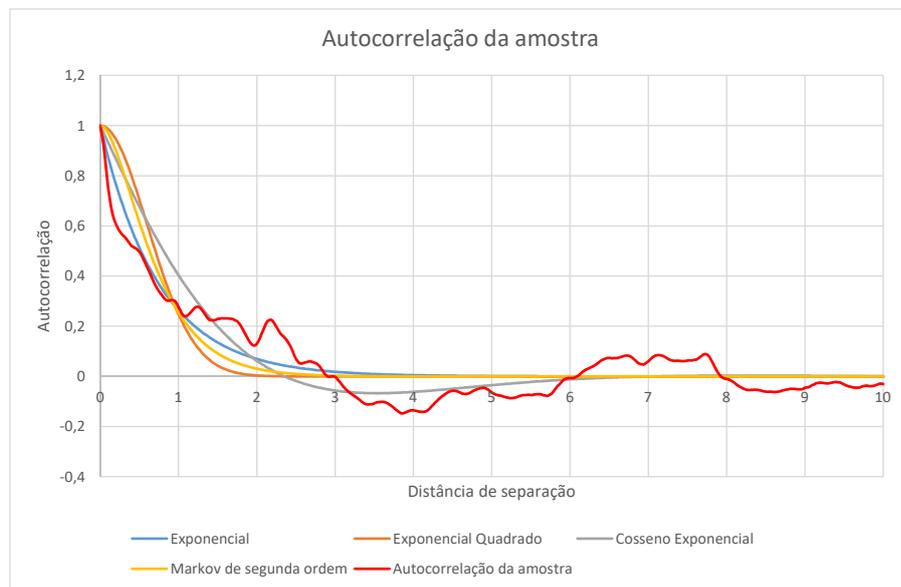


Figura 61: Autocorrelação dos dados de S_u residual pela distância de separação vertical.

