



CONFIABILIDADE DE UMA CONTENÇÃO COM ESTACAS ESCAVADAS UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS: ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

Luiz Augusto da Silva Florêncio¹

Carina Maia Lins Costa¹

Yuri Daniel Jatobá Costa¹

luiz.engh@gmail.com

cmlins@gmail.com

ydjcosta@ct.ufrn.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte¹

Campus Universitário Lagoa Nova, 59078 – 970, Rio Grande do Norte, Natal, Brasil¹.

Jefferson Lins da Silva²

jefferson@sc.usp.br

Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos – USP²

Av. Trabalhador são-carlense, 400, 13566 – 590, São Paulo, São Carlos, Brasil².

Resumo. O projeto de estruturas geotécnicas apresenta incertezas decorrentes da variabilidade natural das propriedades do solo, bem como por causa do conhecimento limitado relacionado aos eventos envolvidos. Portanto, estruturas geotécnicas devem ser analisadas com métodos que permitam uma quantificação explícita dessas incertezas. Por essa razão, nesse estudo, uma análise de confiabilidade geotécnica aplicada a uma típica contenção de estacas escavadas em balanço executada na cidade de Natal-RN foi realizada em conjunto com o Método dos Elementos Finitos. A simulação numérica foi executada com o software Plaxis/2D, utilizando o modelo constitutivo Hardening-Soil para simular o desempenho do solo arenoso local. Os métodos usados na análise de confiabilidade foram o Método de Estimativas Pontuais (MEP) com a modificação de Harr (1989) e a Simulação de Monte Carlo (SMC) em conjunto com o Plaxis/2D, através do Python e do OpenTurns. A probabilidade de falha e o índice de confiabilidade foram calculados para um valor de deslocamento horizontal, admitido como máximo para a contenção. Os resultados mostraram que o índice de confiabilidade tem uma relação linear com os deslocamentos máximos. A distribuição probabilística foi um fator importante nas análises realizadas devendo ser encontrada para cada caso em particular de acordo com as características locais.

Palavras - chave: Confiabilidade Geotécnica, Simulação numérica, Contenção, Estacas escavadas, Solo arenoso.

1. INTRODUÇÃO

Em Natal, as contenções de estacas escavadas são muito utilizadas para conter escavações. Essas contenções trabalham geralmente em balanço e sua estabilidade depende do empuxo passivo do solo atuando na ficha da contenção. Com relação aos aspectos que devem ser verificados, o deslocamento horizontal da contenção é aquele que apresenta maiores incertezas. A falta de uma formulação analítica adequada dificulta ainda uma boa previsão de valores de deslocamento das estruturas.

Somado a incerteza quanto à previsão do valor real dos deslocamentos, têm-se as incertezas inerentes ao solo. O solo, por ser um material bastante heterogêneo e anisotrópico, apresenta uma variabilidade natural de suas propriedades. A dedução de seu comportamento, que faz uso de julgamento particular e limitadas observações de campo também adiciona mais incertezas ao material. Têm-se ainda incertezas devido às condições de carregamento, flutuação de resistência, fenômenos ambientais e incertezas de medição.

As incertezas citadas anteriormente afastam os resultados reais daqueles estimados em projeto. Portanto, se perde parte do controle sobre o projeto geotécnico, adicionando-se sempre um risco às obras. Métodos determinísticos de projeto não são capazes de determinar e tratar tais riscos, não conseguindo levar em conta a variabilidade dos parâmetros e todas suas incertezas em um único valor do fator de segurança (FS). A maneira mais adequada de julgamento dos riscos e tratamento das incertezas é pela teoria de confiabilidade.

Alguns trabalhos na literatura têm utilizado o método dos elementos finitos (MEF) na previsão dos deslocamentos horizontais e métodos probabilísticos na quantificação das incertezas e dos riscos destes deslocamentos para o estado limite de serviço, ELS (Ex.: Schweiger et al, 2001, Schneckendiek, 2006 e Sert et al, 2016). Um recente trabalho de destaque é o de Rippi (2015) que fez uma análise dos modos de ruptura estruturais e geotécnicos de uma estaca prancha ancorada utilizando a ação conjunta entre Plaxis e Python de forma automática.

No Brasil, as pesquisas acadêmicas sobre confiabilidade de estruturas de contenção focam principalmente nos modos de ruptura do estado limite último (ELU) de muros de gravidade (Miranda, 2005; Ribeiro, 2008 e Rodrigues et al., 2016). Em nenhuma destas pesquisas é abordado de maneira específica o risco das contenções ultrapassarem um valor máximo de deslocamento horizontal considerado seguro para o ELS.

Tendo em visto avançar nos estudos sobre confiabilidade e preencher uma lacuna nas pesquisas em âmbito nacional, o presente trabalho apresenta uma análise de confiabilidade geotécnica utilizando o MEF na avaliação do ELS. Essa análise foi realizada para uma típica contenção de estacas escavadas executada em solo arenoso da cidade do Natal, permitindo comparar os resultados por métodos probabilísticos diferentes em relação a possíveis deslocamentos limites máximos.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE DESLOCAMENTOS DE CONTENÇÕES

Os deslocamentos de uma estrutura de contenção são inevitáveis visto que a alteração no estado inicial de tensões induz a movimentação da massa de solo. Sua magnitude está associada a inúmeros fatores como, por exemplo: rigidez da contenção e do solo, presença de

elementos de suporte, sequência construtiva, efeito do tempo, condições geométricas da escavação, distância entre a seção da contenção analisada e a borda da escavação, entre outros fatores. A quantidade de fatores que afetam o deslocamento torna praticamente inviável sua previsão através de uma fórmula analítica capaz de englobar todas as variáveis.

O perfil típico da deformação que a contenção vai apresentar em virtude dos movimentos vai depender muito dos travamentos utilizados. Ou (2006) apresenta a relação entre deformação e travamentos de grande e pouca rigidez. Fica claro em seu estudo que para contenções em balanço ou para um primeiro estágio de escavação sem travamento, o perfil de deformação indica deslocamentos horizontais crescentes a partir da base da contenção, sendo o deslocamento horizontal máximo observado no topo.

Na prática, normalmente, se faz uma estimativa inicial do deslocamento horizontal e adoção de um valor máximo com base no tipo de estrutura de contenção, tipo de solo e altura de escavação. Esses valores máximos de deslocamento definem, por exemplo, o nível de alerta, que é um valor de deslocamento horizontal que indica a necessidade de maior monitoramento e definem também o nível de ação, que é outro valor limite de deslocamento máximo em que se torna necessária a intervenção na obra a fim de evitar sua falha. Milititsky (2016), por exemplo, apresenta valores de controle para sistema de monitoramento utilizado em algumas obras que envolveram escavações.

Alguns autores trazem valores máximos de deslocamento horizontal em que a segurança do estado limite de serviço é garantida. A Tabela 1 traz valores de deslocamentos horizontais máximos aceitáveis e observados em contenções instrumentadas em função da profundidade de escavação (H).

Tabela 1. Deslocamentos horizontais máximos observados.

Referência	Tipo de estrutura	Tipo de solo	Deslocamento Máximo Observado
Oliveira et al (2009)	Parede Diafragma	Areia argilosa	0,33%H*
Clough and O'Rourke (1990)	<i>Bottom - up constructions</i>	Areia	0,5%H
Hsieh et al (2003)	Parede Diafragma	Areia e Silte	0,3%H a 0,5%H
Santos (2013)	Cortina de estacas escavadas atirantadas	Areia	0,18%H a 0,66%H

H*- Profundidade de escavação.

Esses valores foram obtidos com base em observação de obras e podem ser muito conservadores, servindo apenas como estimativa inicial. Devido à complexidade do problema, a análise dos deslocamentos é melhor investigada através de um software que trabalhe com o método dos elementos finitos. Tais ferramentas apesar de boa precisão e possibilidade de simular diferentes cenários tem sua acurácia relacionada com os valores de entrada e os modelos constitutivos adotados.

3. MÉTODOS PROBABILÍSTICOS

3.1 Método de Estimativas Pontuais (MEP)

Proposto por Rosenblueth (1975) o MEP é um método aproximado simples e com resultados de boa precisão, que visa à obtenção dos momentos de uma função de estado limite com n variáveis, estimando 2^n pontos em que o valor de cada variável é acrescido e diminuído um desvio padrão em relação a seu valor médio. Essas variáveis são então combinadas e posteriormente multiplicadas por pesos apropriados. Para o caso de não haver correlação entre as variáveis aleatórias, os pesos serão iguais a $1/2^n$. Por ser um método simples, sua implementação em Excel é bastante usual e prática.

Uma grande limitação do método é o fato de serem necessários 2^n pontos de estimativas. Dessa forma, muitas vezes o número de estimativas torna-se grande para aplicações práticas, mesmo com uso de ferramentas computacionais. Deste modo, algumas propostas de modificações surgiram para reduzir esse número de avaliações. A modificação utilizada no presente trabalho foi a de Harr (1989), que consiste em calcular autovalores e autovetores da matriz de correlação e utilizá-los para obter o valor da variável em determinado ponto, passando de 2^n para $2n$ estimativas.

3.2 Simulação de Monte Carlo (SMC)

A Simulação de Monte Carlo é um método conhecido como puramente probabilístico, que atribui um conjunto de valores aleatórios para os vetores das variáveis de entrada do problema a ser estudado. Esses valores aleatórios são obtidos de acordo com a distribuição probabilística de cada variável aleatória. Com essa amostra de conjunto de valores de entrada, uma interação (cálculo da função de estado limite) é realizada e seu resultado (variável de interesse) é armazenado.

A SMC pode lidar com funções de estado limite não regulares e não lineares. Por essa razão é um método bastante utilizado na solução de problemas complexos e na verificação de soluções analíticas aproximadas. Uma vez que não oferece limite para o número de variáveis aleatórias ou para a complexidade do modelo, a SMC resolve problemas com muitas ou poucas variáveis com a mesma capacidade.

A SMC não aplica nenhuma aproximação e por essa razão a geração de muitas interações torna-se necessária para que haja convergência do resultado e diminuição dos erros. Isso faz com que, apesar de sua simplicidade conceitual, um grande esforço computacional seja necessário para obter resultados com boa acurácia. A Eq. (1) traz a probabilidade de falha (P_f) segundo Monte Carlo dado pelo cálculo frequentista.

$$P_f = \frac{n_f}{n} \quad (1)$$

Definindo uma função de estado limite genérica $Z(x) = R(x) - S(x)$, onde $R(x)$ são as parcelas resistentes do problema e $S(x)$ são as parcelas solicitantes tem-se que na Eq. (1) n é o número total de avaliações de $Z(x)$ e n_f o número de simulações onde $Z(x) < 0$. Observa-se que quanto maior o número de simulações aumenta-se a probabilidade dessas simulações atingirem o domínio de falha.

3.3 Ação conjunta de métodos probabilísticos com MEF

A versão VIP do Plaxis/2D 2016 permite ao usuário controlá-la remotamente por intermédio de um script de comando com a linguagem de programação Python. Dessa forma, pode-se executar qualquer comando disponível no Plaxis além de obter e salvar seus resultados. Com isso, pode-se fazer facilmente uma análise de confiabilidade. Essa análise será feita através do OpenTurns (OT) que é uma biblioteca científica que funciona como um módulo do Python dedicado ao tratamento de incertezas. Entre outras características o OT abrange 47 tipos de distribuições de probabilidade; diversos métodos probabilísticos como o First Order Reliability Method, SMC, Directinal Sampling, entre outros.

A ação conjunta da análise de confiabilidade entre o Plaxis/2D 2016 e o Python/OT requer uma interface para comunicação entre eles. Quando uma ferramenta de confiabilidade é acoplada a outro programa, o software de confiabilidade executa toda a análise probabilística e usa o software de elementos finitos apenas para a avaliação da função de estado limite.

Mais precisamente, o código no Python obtido da biblioteca OT deve ser capaz de ler e interpretar os dados de entrada e os resultados do Plaxis/2D; executar a SMC; armazenar os resultados e enviar os próximos dados das variáveis para o Plaxis. O Plaxis, por sua vez, tem que receber os comandos do Python/OT habilitando o programa para fazer os cálculos impostos e recuperar os resultados pré-definidos e enviar ao Python/OT, em um processo interativo. O script utilizado nessa pesquisa foi desenvolvido com base nos manuais do OpenTurns (OpenTURN 1.7, 2016) e no trabalho de Rippi (2015).

4. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

A metodologia seguida nesse estudo de confiabilidade compreendeu três passos básicos. O primeiro foi à definição do problema, identificação das variáveis aleatórias, o modelo que será estudado e suas características. O segundo passo foi a quantificação das incertezas, onde foram atribuídas características probabilísticas às variáveis escolhidas no passo anterior e por fim, a utilização dos métodos probabilísticos escolhidos. Esse é o passo central da análise, pois nessa etapa, a probabilidade de falha (Pf) e o índice de confiabilidade (β) foram obtidos.

4.1 Modelo proposto e variáveis aleatórias

A contenção a ser analisada tem o paramento composto por estacas escavadas de concreto, tipo bastante comum executado em Natal/RN. A ferramenta numérica utilizada no presente estudo foi o Plaxis/2D 2016. O modelo geométrico da contenção a ser avaliada nesse trabalho pode ser visto na Figura 1. Os limites do modelo geométrico foram baseados nas recomendações de Brinkgreve (2005). O comprimento da estaca da contenção, a profundidade de escavação e consequentemente sua ficha, foram baseados em valores usuais para projetos realizados na cidade de Natal/RN.

Pelo modelo observa-se a existência de uma única camada de solo arenoso tanto para o aterro quanto para o solo de fundação. Assume-se que o nível de água está abaixo da contenção e não influencia em seu desempenho. Os dados dos parâmetros de entrada utilizados no modelo constitutivo do solo e da contenção foram adotados utilizando-se

resultados de sondagens à percussão de simples reconhecimento (SPT) e de ensaios triaxiais convencionais do tipo CD apresentados por Oliveira (2014).

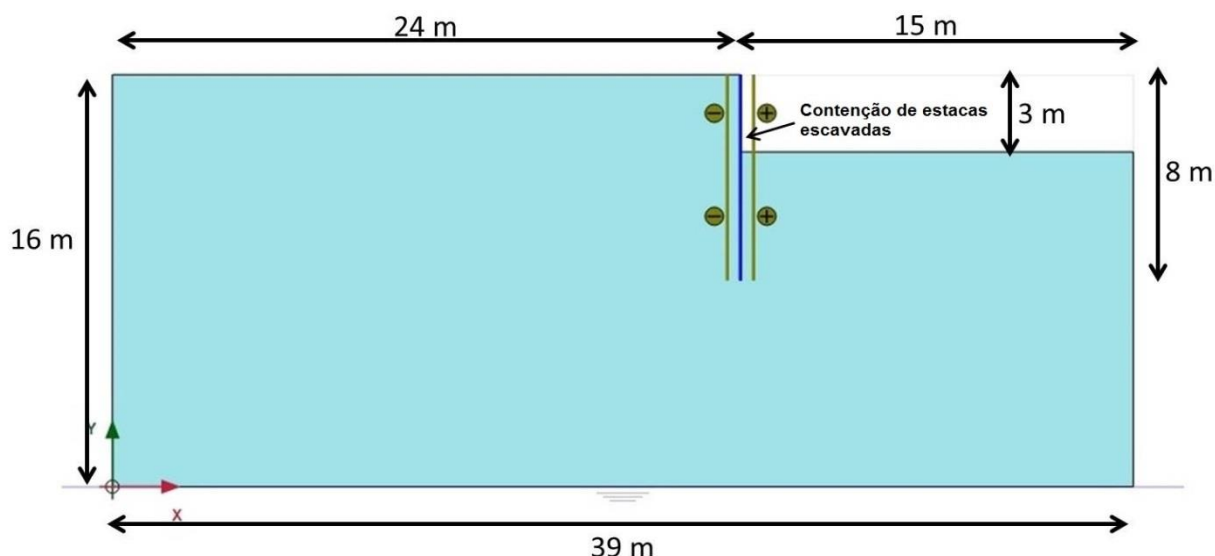


Figura 1. Geometria do modelo para a contenção de estacas escavadas em balanço.

Para simular a parte estrutural da cortina adotou-se um modelo elástico linear, pois o mesmo é suficiente para obter resultados condizentes com a realidade, assumindo que a contenção é formada por materiais que seguem a lei de Hooke, como o concreto por exemplo. Os parâmetros adotados estão presentes na Tabela 2.

O modelo constitutivo Hardening-Soil foi utilizado para o solo por ser o que melhor simula o desempenho de maciços arenosos. É um modelo constitutivo não linear, elástico perfeitamente plástico e que segue o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Ele tem uma relação hiperbólica entre a deformação axial e a tensão desviatória, apresentando três parâmetros de deformabilidade do solo para situações de aplicação de carga e descarga. A Tabela 3 traz os valores, notação e unidade dos parâmetros desse modelo para solos arenosos fofos a medianamente compactos típicos da região.

Tabela 2. Parâmetros da contenção adotados no Plaxis/2D para o modelo Elástico Linear.

Parâmetro	Notação	Valor	Unidade
Rigidez Axial	EA	$4,52 \times 10^6$	kN/m
Rigidez Transversal	EI	$2,53 \times 10^4$	kNm ² /m
Peso linear	w	15,00	kN/m/m
Coeficiente de Poisson	ν	0,2	-

Tabela 3. Parâmetros do solo adotados no Plaxis/2D para o modelo Hardening-soil.

Parâmetro	Notação	Valor	Unidade
Peso específico seco	γ_{unsat}	18,00	kN/m ³
Índice de vazios inicial	e_0	0,5	-
Módulo de deformabilidade Secante	E_{50}^{ref}	20,0	MPa
Módulo de deformabilidade Edométrico	E_{oed}^{ref}	32,0	MPa
Módulo de deformabilidade Carregamento/Descarregamento	E_{ur}^{ref}	55,0	MPa
Ângulo de atrito efetivo	ϕ'	30,1	°
Coesão efetiva	c'	0,0	kPa
Ângulo de dilatação	ψ	0,0	°
Coeficiente de Poisson	ν	0,3320	-
Coeficiente de empuxo no repouso	K_0^{nc}	0,5120	-
Fator de Rigidez de interface	R_{int}	0,500	-

Na definição da malha para o modelo geométrico foi escolhido uma malha de refinamento médio com maior refinamento dos elementos perto da contenção. O Plaxis/2D gerou automaticamente a malha de acordo com esses critérios resultando em 412 elementos triangulares e 3514 nós. O ponto no topo da contenção, previamente selecionado para obtenção dos deslocamentos, encontra-se no nó 508, nas coordenadas X = 24,00 m, Y = 16,00 m. A Figura 2 mostra a malha dos elementos finitos com o ponto selecionado.

Essa é uma análise de confiabilidade puramente geotécnica, portanto as variáveis aleatórias são os parâmetros do solo definidos anteriormente na Tabela 3. Escolheram-se aqueles que claramente têm uma maior influência no deslocamento da contenção: peso específico seco, módulo de deformabilidade secante, ângulo de atrito efetivo do solo e a rigidez de interface. As distribuições probabilísticas adotadas e seus valores de Coeficiente de Variação (C.V.) foram escolhidos de acordo com recomendações presente em diversas pesquisas (Kulhawy, 1992; Phoon e Kulhawy, 1999, Lumb, 1974; Hoeg e Murarka, 1974; Schultze, 1975 e Rippi, 2015). Os valores de C.V. adotados segundo essas referências estão na Tabela 4.

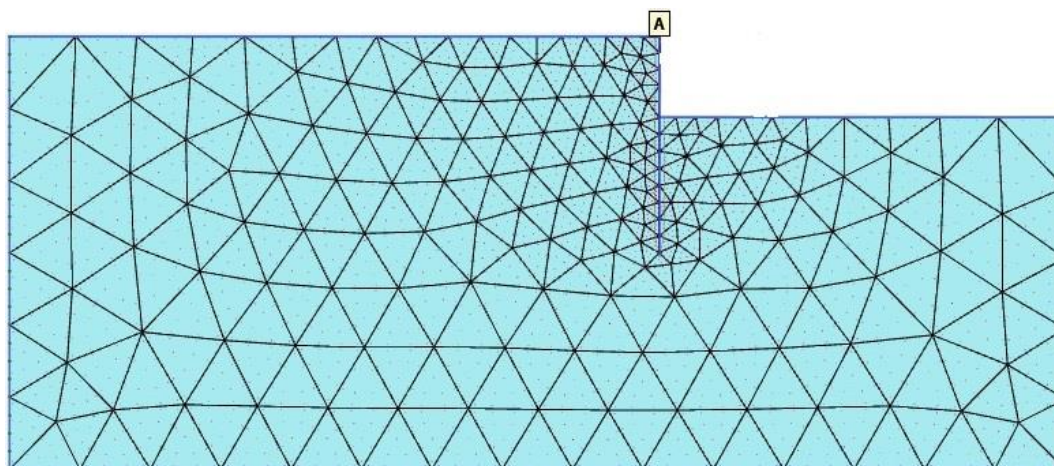


Figura 2. Malha dos elementos finitos com o ponto A de análise dos deslocamentos.

Os valores médios adotados foram os próprios valores da Tabela 3. Pela falta de dados de campo estatisticamente representativos, as distribuições adotadas foram a distribuição Normal (D.N.) e a LogNormal (D.LN.), pois são as duas que melhor ajustam os parâmetros do solo, justificáveis pelo Teorema do Limite Central.

A fim de evitar erros de cálculo no Plaxis/2D pela adoção de valores fisicamente irreais para os parâmetros, adotaram-se na SMC distribuições truncadas para as variáveis, ou seja, distribuições que tenham valores máximos e mínimos que fazem sentido para a realidade dos solos de Natal/RN. Para o ângulo de atrito efetivo seu valor mínimo atribuído foi de 24° e o valor máximo de 36° . O peso específico seco teve valores mínimo e máximo respectivamente de 16 kN/m^3 e 20 kN/m^3 . A rigidez de interface R_{int} teve uma variação de valores de 0,4 a 0,65 e por fim o módulo de deformabilidade secante variou entre 12 MPa e 27,5 MPa.

Esses valores também foram definidos de acordo com os valores máximos e mínimos da combinação feita pelo método de estimativas pontuais, a fim de padronizar ao máximo as características das variáveis aleatórias nos dois métodos e possibilitar melhor comparação entre seus resultados. Na Tabela 4 segue um resumo das características das variáveis aleatórias adotadas nesse estudo de confiabilidade.

Tabela 4. Propriedades probabilísticas das variáveis aleatórias.

Variável aleatória	Distribuição probabilística (MEP)	Distribuição probabilística (SMC)	Média	C.V. (%)	Desvio padrão
ϕ'	D.N./ D.LN.	D.N./ D.LN. Truncada	$30,1^\circ$	10	3,01
γ_{unsat}	D.N./ D.LN.	D.N./ D.LN. Truncada	$18,00 \text{ kN/m}^3$	5	0,9
E_{50}^{ref}	D.N./ D.LN.	D.N./ D.LN. Truncada	20,0 MPa	20	4,0
R_{int}	D.N./ D.LN.	D.N./ D.LN. Truncada	0,5	20	0,1

4.2 Mecanismo de falha e função de estado limite

O critério adotado foi a probabilidade do modelo exceder um valor limite de deslocamento horizontal. A função de estado limite Z está representada na Eq. (2).

$$Z = u_{max} - u_{plaxis} \quad (2)$$

Onde u_{max} é o valor de deslocamento horizontal máximo adotado como admissível para o topo da contenção baseado nas recomendações da Tabela 1 e u_{plaxis} o valor de deslocamento horizontal no topo da contenção obtido pelo Plaxis/2D a cada simulação. Haverá falha para $Z < 0$, ou seja, se $u_{plaxis} > u_{max}$.

O valor de u_{max} deve ser grande suficiente para que possa servir como critério de ruptura pelo Plaxis/2D, mas não deve ser tão alto a ponto de ultrapassar seus limites de cálculo. Desse modo, foram pesquisados os valores máximos e mínimos de deslocamento horizontal que o Plaxis/2D é capaz de calcular para o modelo especificado e suas características probabilísticas.

Foram escolhidos três valores de u_{max} possíveis de causar danos à contenção para observar a probabilidade de falha de cada um segundo a Eq. (2). O primeiro valor será de 1%H, valor usualmente adotado, sendo H a profundidade de escavação igual a 3,00 m. Neste caso, 1%H = 0,03 m; 0,5%H = 0,015 m, valor mais rigoroso e por último, o valor fixo de 0,10 m, que seria uma condição extrema de grande deformação.

5. RESULTADOS

A avaliação da amplitude de valores de deslocamentos horizontais que o Plaxis/2D é capaz de gerar para o modelo proposto foi feita de maneira automática com o Python/OT e chama-se de *Max/Min approach*. O objetivo desse experimento é a geração e armazenamento de resultados do Plaxis seguindo a atribuição de valores aleatórios para os dados de entrada, segundo as distribuições probabilísticas definidas na Tabela 4. Foram realizadas 100 simulações para cada um dos tipos de distribuição probabilística e os resultados estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5. Valores máximos e mínimos de deslocamento horizontal.

Distribuição Probabilística	$u_{plaxisMin}$ (m)	$u_{plaxisMax}$ (m)
Normal	0,022957	0,0761696
LogNormal	0,018017	0,0521518

Utilizando o modelo MEP modificado por Harr (1989) inicialmente com todas as variáveis aleatórias com distribuição probabilística Normal e sem correlação entre elas, têm-se oito simulações, visto que se têm quatro variáveis aleatórias. A combinação dos valores dessas oito simulações pode ser vista na Tabela 6. Na Tabela 6, têm-se também os resultados de deslocamento horizontal do Plaxis/2D para cada simulação. No gráfico da Figura 3, têm-se

os valores de índice de confiabilidade (β) de acordo com os valores da Tabela 6 para os três u_{max} adotados.

Tabela 6. Combinações para o método MEP com seus respectivos resultados.

Combinação	ϕ' (°)	γ_{unsat} (kN/m ³)	E_{50}^{ref} (MPa)	R_{int} (-)	Resultado u_{plaxis} (m)
1	36,12	18,0	20,0	0,3971	0,02947
2	24,08	18,0	20,0	0,6484	0,03796
3	30,1	19,8	20,0	0,4999	0,03097
4	30,1	16,2	20,0	0,4999	0,02895
5	30,1	18,0	28,0	0,4999	0,02718
6	30,1	18,0	12,0	0,4999	0,03478
7	30,1	18,0	20,0	0,5064	0,02931
8	30,1	18,0	20,0	0,4934	0,03007

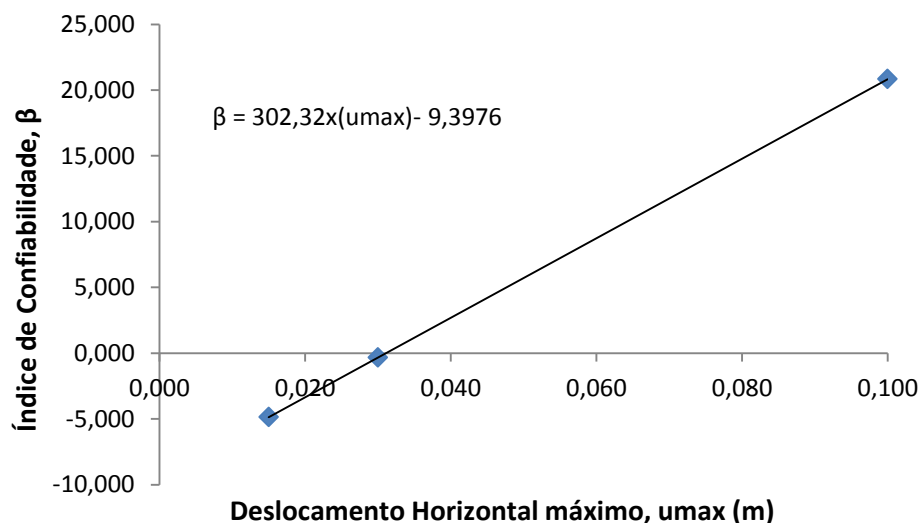


Figura 3. Índice de confiabilidade x Deslocamento horizontal máximo admissível.

Observa-se que com o aumento do valor de u_{max} , o β vai aumentando de maneira linear. Observa-se que um u_{max} de 0, 10 m está além do limite superior de deslocamento possível de ser calculado pelo Plaxis/2D para a distribuição Normal, logo $P_f = 0$ com um $\beta = 20,834$. O mesmo acontece com o menor valor adotado, u_{max} de 0,015 m, que é menor do que o valor

mínimo capaz de ser calculado, logo qualquer valor será maior que esse limite e, portanto $P_f = 1(100\%)$ e $\beta = -4,863$. Para o valor de $u_{max} = 0,030$ m, $P_f = 0,6287$ (62,87%) e $\beta = -0,328$.

Os valores negativos de β para 0,015 e 0,030 m indicam que os valores médios utilizados na análise de confiabilidade nas condições impostas já se encontram dentro do domínio de falha para esses dois deslocamentos admissíveis. Eles irão ocorrer para qualquer valor de deslocamento admissível (u_{max}) menor do que 0,03108 m, segundo a equação presente na Figura 3. De maneira geral, uma contenção pode ser considerada segura e com probabilidade de falha remota se $\beta \geq 3,00$ (Clemens, 1982 e Dell'avanzi e Sayão, 1998).

De modo a definir melhor os riscos relacionados aos deslocamentos, novos valores de u_{max} dentro da amplitude possível foram adicionados: 0,045 m; 0,055 m e 0,060 m. A Figura 4 traz a inclusão dos novos pontos no gráfico anterior.

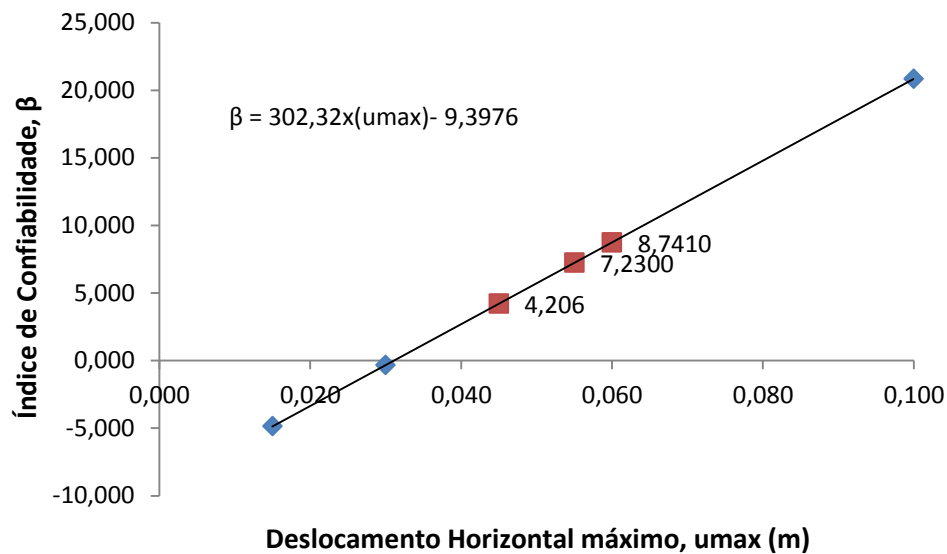


Figura 4. Novos deslocamentos para o gráfico de $\beta \times u_{max}$.

Vê-se na Figura 4 que a adição dos novos pontos manteve a mesma linearidade anterior do gráfico. Os resultados para os novos pontos podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados das simulações segundo MEP para os novos pontos.

Deslocamento horizontal máximo admissível (m)	Probabilidade de falha	Índice de confiabilidade (β)
0,045	$1,30 \times 10^{-5}$	4,206
0,055	$2,42 \times 10^{-13}$	7,230
0,060	0,0	8,741

Estes resultados foram confrontados por um método mais robusto, a SMC. Fixou-se um número de 500 interações no Plaxis/2D para a análise da função de estado limite. O resultado da confiabilidade segundo a SMC para $u_{max} = 0,030$ m é descrito em detalhes a seguir. A probabilidade de falha encontrada foi de 0,6545 (65,45%), valor bastante próximo do encontrado através do MEP. A variância de Pf, ou seja, sua dispersão em torno da média é de 0,0041, o que mostra bastante confiança no resultado encontrado.

Adotou-se um erro tolerável máximo (α) de 5% na simulação de Monte Carlo, logo o nível de confiança ($1 - \alpha$) nos cálculos do modelo será de 95%. O número de interações executados nessa análise foi de 55 e não 500 como fixado anteriormente, pois os erros mantiveram-se abaixo dos 5%. O intervalo de confiança para esse nível de confiança compreende [0,5289; 0,7802]. Os outros resultados da SMC estão resumidos na Tabela 8. Na Tabela 9, tem-se um comparativo das probabilidades de falha, entre a SMC e o MEP.

Tabela 8. Resultados das simulações segundo Monte Carlo.

Deslocamento horizontal máximo admissível (m)	Número de avaliações	Pf (%)	Variância de Pf	Intervalo de confiança (95%)
0,015	30	100	0,0	[1,0; 1,0]
0,045	353	22,1	0,00048	[0,1777; 0,2642]
0,055	500	6,8	0,00013	[0,0459; 0,0901]
0,060	500	3,8	$7,31 \times 10^{-5}$	[0,0212; 0,0548]

Tabela 9. Comparação dos resultados entre a SMC e o MEP.

Deslocamento horizontal máximo admissível (m)	Probabilidade de falha – MEP (%)	Probabilidade de falha – SMC (%)
0,015	100	100
0,030	62,87	65,45
0,045	0,0	22,1
0,055	0,0	6,8
0,060	0,0	3,8

Utilizando a SMC fez-se por fim simulações adotando para as variáveis aleatórias uma distribuição LogNormal, truncada com os mesmos valores máximos e mínimos definidos anteriormente. Os resultados estão presentes na Tabela 10, em comparação com os resultados utilizando a distribuição Normal truncada.

Tabela 10. Probabilidade de falha segundo SMC para D.N. e D.LN.

Deslocamento horizontal máximo admissível (m)	Probabilidade de falha – SMC (%)	
	Distribuição Normal Truncada	Distribuição LogNormal Truncada
0,015	100	100
0,045	22,1	11,6
0,055	6,8	0,79
0,060	3,8	0,0

Os resultados mostram que a probabilidade de falha foi menor em todos os casos, comprovando que a distribuição Normal é aquela que resulta em maiores valores de P_f mantendo-se os outros parâmetros constantes, ou seja, se o usuário não conhece a distribuição das variáveis com que se vai trabalhar a distribuição Normal está a favor da segurança.

6. CONCLUSÕES

Para as distribuições propostas nesse estudo, a amplitude de valores de deslocamento lateral para a distribuição LogNormal foi menor do que a da distribuição Normal. Esse resultado mostra a importância da análise de amplitude, pois ela auxilia na definição dos deslocamentos admissíveis para cada distribuição em particular. Dessa forma, elimina-se a possibilidade de adotar valores de deslocamento admissíveis que o Plaxis/2D não seja capaz de calcular para as propriedades probabilísticas definidas.

Os resultados da análise de confiabilidade pelo MEP revelou que o índice de confiabilidade (β) tem uma relação linear com os valores de deslocamento máximos admissíveis adotados, e quanto maior o u_{max} maior o β . Para as características adotadas e com todas as variáveis com distribuição Normal, tem-se, segundo a Figura 3 do MEP, uma probabilidade remota de ocorrência de falha para valores de deslocamento máximo admissível igual ou maiores a 0,041 m.

Os resultados mostraram que o script da simulação de Monte Carlo desenvolvido para a ação conjunta entre o Plaxis/2D e o Python/OT obteve resultados bastante próximos do

método de estimativas pontuais para os valores de u_{max} de 0,030 m e 0,015 m. Para os outros deslocamentos admissíveis máximos a probabilidade de falha da SMC foi bem maior em relação ao MEP. Isto ocorre pelo maior número de simulações da SMC, logo ele é capaz de aplicar a variância das variáveis aleatória de maneira mais próxima da realidade e em um maior número de pontos que irão caracterizar a função de desempenho.

A distribuição probabilística também afetou o valor final de probabilidade de falha para o modelo em estudo. No caso dessa pesquisa, observou-se a diferença de probabilidade de falha do ELS entre as duas distribuições para o método de Monte Carlo, sendo a maior diferença para $u_{max} = 0,045$ m. Com isso, vê-se a importância de se utilizar para cada análise de confiabilidade dados reais do local em estudo, através de coleta de dados e de amostras para futuros ensaios ou correlações, em um número que seja estatisticamente representativo.

REFERÊNCIAS

- Brinkgreve, R.B.J., 2005. *Course notes: international course for experienced Plaxis users (English)*. The Netherlands.
- Clemens, P.L., 1982. *Combinatorial Failure Probability Analysis Using MIL-STD 882* – Notice – February.
- Clough, G. W.; O'Rourke, T. D., 1990. *Construction induced movements of in situ walls*. ASCE Special Publication 15, Proc design and performance of earth retaining structures, Cornell University, pp. 439-470.
- Dell'avanzi, E. e Sayão, A.S., 1998. *Avaliação da Probabilidade de Ruptura de Taludes*. In: COBRAMSEG, 11, Brasília, Anais. Brasília, v. 2, p. 1289-1295.
- Harr, M.E., 1989. *Probabilistic estimates for multivariate analyses*. Applied Mathematical Modelling; 13(5):313–318.
- Hoeg, K.; Murarka, R.P., 1974. *Probabilistic analysis of retaining wall*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 100 (GT3), pp. 349 – 370.
- Hsieh, H. S., Wang, C. C.; Ou, C. Y., 2003. *Use of Jet Grouting to Limit Diaphragm Wall Displacement of a Deep Excavation*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, Vol. 129, nº 2, pp. 146-157.
- Kulhawi, F. H., 1992 *On the Evaluation of Soil Properties*. ASCE. Geotechnical Special Publication, Nº31, p.p. 95-115.
- Lumb, P., 1974. *Application of statistics in soil mechanics*. Soil Mechanics: New Horizons. Lee, I. K., ed., London, Newnes-Butterworth: 44–112, 221–239.
- Milititsky, J., 2016. *Grandes escavações em perímetro urbano*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Miranda, M.F., 2005. *Avaliação da estabilidade de contenções através de métodos probabilísticos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.
- Oliveira, J. R. M. S.; Marques, M. E. S.; Cabral, D. A.; Silva, M. R. L.; Carneiro, L. A. V. 2009. *Deslocamentos Horizontais em uma Parede Diafragma*. In: Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, 5, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos – ABMS, v. 1, p. 245 – 250, São Paulo.

Oliveira, L. H. B., 2014. *Modelagem numérica de uma estrutura de contenção de estacas espaçadas atirantadas em areia*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal.

OpenTURNS 1.7, 2016. *Use Cases Guide for the Textual User Interface*. Documentation built from package openturns doc.

Ou, C. Y., 2006. *Deep excavation: theory and practice*. London: Taylor and Francis Group.

Phoon, K. K., Kulhawy, F. H., 1999. *Characterization of geotechnical variability*. Canadian Geotechnical Journal 36(4): 612–624.

Ribeiro, R.C.H., 2008. *Aplicações de Probabilidade e Estatística em Análises Geotécnicas*. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Rippi, A., 2015. *Structural reliability analysis of a dike with a sheet pile wall - Coupling Reliability methods with Finite Elements*. Master of Science, Delf University of Technology.

Rodrigues, M.A.; Zuccolo, P.L.; Santos, M.G.C.; Silva, J.L., 2016. *Probabilidade de falha de muro de solo envelopado com geogrelha*. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, ABMS.

Rosenblueth, E., 1975. *Point estimates for probability moments*. Proceedings, National Academy of Science 72(10): 3812–3814.

Santos, F. A., 2013. *Avaliação do desempenho de uma cortina de estacas espaçadas, atirantada, em areia*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Schultze, E., 1975. *Some aspects concerning the application of statistics and probability to foundation structures*. Second International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering, Aachen :457 – 494.

Schweckendiek, T., 2006. *Structural Reliability applied to Deep Excavations Coupling Reliability Methods with Finite Elements*. TU Delft, Delft.

Schweiger, H. F.; Shurner, R.; Pottler, R., 2001. *Reliability analysis in Geotechnics with deterministic finite elements*. The international journal of geomechanics, volume 1, number 4, p.389 – 413.

Sert, S.; Suo, Z.; Siao, J.; Song, W.; Suang, C. H., 2016. *Probabilistic analysis of responses of cantilever wall supported excavations in sands considering vertical spatial variability*. In.: Computers and Geotechnics, Vol. 75, pp. 182-191.