



Análise de Confiabilidade do Cais do Porto Velho - Rio Grande/RS Através de Ferramentas de Equilíbrio Limite e Elementos Finitos

Luiza Antiqueira da Silvas Neta^{1*}; Diego de Freitas Fagundes^{2*}; Antônio Marcos de Lima Alves^{3*}.

Resumo: O presente estudo analisa a estabilidade global do Cais do Porto Velho, estrutura do complexo portuário da cidade do Rio Grande - RS, Brasil. Tal estrutura é um cais de gravidade com extensão de 640 m a qual vem apresentando deslocamentos excessivos em um trecho de 150 m. Com o objetivo de compreender a estabilidade da estrutura em função da aplicação de ferramentas de Equilíbrio Limite e Elementos Finitos através dos Métodos de Monte Carlo e FOSM. Serão analisados quatro cenários que representam a evolução da erosão da base da estrutura do cais, em que pode-se concluir que conforme ocorre a perda do solo e do enrocamento da base, a mesma apresenta redução do fator de segurança e segundo o MEF resultando na ruptura da mesma. Além disto, através da análise MEF, é possível observar que o critério de resistência do enrocamento de proteção do cais possui uma significativa influência sobre a estabilidade da mesma, uma vez que quando esta é considerada como linear elástica a estrutura apresenta um comportamento muito semelhante ao encontrado pelo MEL, em contrapartida, quando adota-se o critério de Mohr Coulomb, a estrutura apresenta um comportamento mais representativo do que é observado in loco.

Palavras-chave: Cais do Porto Velho da cidade de Rio Grande - RS, Análise de Estabilidade, Muro de Arrimo, Análise de Confiabilidade, Método do Equilíbrio Limite; Método dos Elementos Finitos.

¹ Universidade Federal do Rio Grande / antiqueiraneta@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande / dffagundes@gmail.com

³ Universidade Federal do Rio Grande / antonioalves@furg.br

1 INTRODUÇÃO

Jiang et al. (2022) afirmam que em análises determinísticas tradicionais de estabilidade de taludes, as incertezas relacionadas ao problema são comumente negligenciadas. A melhor compreensão dessas incertezas, intrínsecas ou epistêmicas, tornou-se objeto de grande interesse em pesquisas geotécnicas nas últimas duas décadas.

De acordo com Vanmarcke (1977), muitas são as incertezas envolvidas na engenharia de taludes, principalmente no que se refere à variabilidade espacial das propriedades geotécnicas e às incertezas associadas ao cálculo determinístico para estimar a margem de segurança da estabilidade de taludes. A avaliação quanto à estabilidade de taludes é influenciada à medida que a variabilidade do solo afeta sistematicamente ou aleatoriamente as análises. Assim, há uma complexibilidade na variabilidade geotécnica, resultante das diversas fontes de incerteza, como as propriedades mecânicas e físicas de solos e rochas que se apresentam naturalmente dispersas, acrescendo a essa, as imprecisões nos modelos de transformação e as incertezas referentes ao erro humano. (Phoon and Kulhawy 1999)

Segundo Ditlevsen (1979) a falha do sistema ocorre quando o talude desliza ao longo de uma superfície crítica. Assim, a análise de confiabilidade de talude é então definida como um problema de análise de confiabilidade do sistema, no qual a probabilidade de falha geral (ou probabilidade de falha do sistema, P_f ,s) de um talude, considerando várias superfícies de deslizamento potenciais, é de interesse e é maior do que a probabilidade de falha de qualquer superfície de deslizamento potencial individual por consequência dos efeitos do sistema.

O Cais do Porto Velho de Rio Grande/RS (Figura 1), começou a apresentar, no de 2000, excessivo deslocamento em direção à água e formação de fissuras no pavimento, possivelmente relacionadas à falha da estrutura (Figura 2). Deste modo, o presente trabalho tem como proposta analisar a estabilidade do Cais do Porto Velho, bem como inferir a evolução do fator de segurança à medida em que ocorre um processo erosivo na base do muro do cais, para isto será empregado dois métodos de análise, o Método de Equilíbrio Limite e o Método de Elementos Finitos.

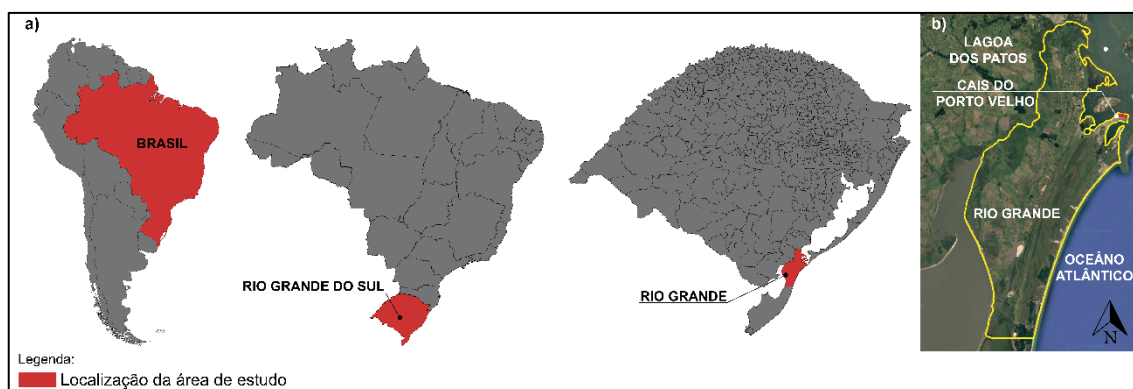


Figura 1: a) Identificação continental, estadual e municipal do local estudado; b) Localização do Cais de Porto Velho no município de Rio Grande.



Figura 2: a) Identificação da área de estudos; b) Deslocamento dos blocos da estrutura do cais; c) Variação de altura ao longo dos paralelepípedos do pavimento e dos blocos de coroamento do muro de gravidade; d) Deslocamento do muro de gravidade em direção ao canal de navegação; e) Área onde os deslocamentos são mais intensos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Método Determinístico

As técnicas mais usuais para a análise de estabilidade de taludes são determinísticas. Tais técnicas assumem constância das variáveis utilizadas no modelo de cálculo. Usualmente essa metodologia utiliza o Método do Equilíbrio Limite (MEL) para determinar o fator de segurança mínimo para a superfície de ruptura do talude (Ortigão e Sayão, 2004).

Segundo Cho (2010) os problemas de estabilidade de taludes são comumente analisados usando o MEL. A massa de solo que falha é dividida em um número de camadas verticais (fatias) para calcular o fator de segurança, que é definido como a razão entre as tensões de resistência ao cisalhamento pelas tensões cisalhantes mobilizadas, assim o equilíbrio estático entre as fatias e a massa como um todo são usadas para resolver o problema de estabilidade. No entanto, todos os métodos de fatias são estaticamente indeterminados e, como resultado, requerem suposições para resolver o problema.

Outra técnica para a análise de estabilidade de taludes é através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Segundo Zaman et al., (2000) o MEF representa uma alternativa de abordagem poderosa para análise de estabilidade de taludes. Este método é preciso,

versátil e requer menos suposições a priori, especialmente em relação ao mecanismo de falha. Neste método é considerada a mudança da condição de tensão-deformação no solo, concentrando-se assim principalmente no mecanismo de falha durante uma ruptura em talude (Duncan, 2014).

Segundo Griffiths and Lane (1999) no método em questão os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo c' e $\tan \phi'$ são reduzidos por um Fator de Redução de Resistência (SRF) até que ocorra a falha conforme (Equação 1). No presente estudo utilizou-se o software PLAXIS 2D (2016) para a análise da estabilidade. Entende-se que o valor do fator de segurança é o mesmo valor do SRF no momento da falha.

$$SRF = \frac{\tan(\phi')}{\tan(\phi'_{reduzido})} = \frac{c'}{c'_{reduzido}} \quad (1)$$

2.2 Método Probabilístico

Os procedimentos probabilísticos para a análise de estabilidade de taludes variam em suposições, limitações, capacidade de lidar com problemas complexos e complexidade matemática. A maioria deles, no entanto, caem em uma de duas categorias: métodos aproximados (Método FOSM, Método de Estimativas Pontuais) e Simulação de Monte Carlo (El-Ramly, 2002).

Segundo Da Re et al. (2001) a análise de confiabilidade fornece um método sistemático para avaliar combinadas influências de incertezas dos parâmetros que afetam o fator de segurança. Assim, a análise probabilística avalia as condições de estabilidade de taludes, considerando os erros associados à natureza do problema e à variabilidade das características do talude e do solo que o constitui. Por essa análise, caracteriza-se a segurança de um talude pelo valor do fator de segurança (FS) baseado em valores médios corrigidos por parâmetros probabilísticos ou, pelo valor do índice de confiabilidade (β), que envolve implicitamente o comportamento de uma função de parâmetros aleatórios, a qual define o estado de segurança de um talude.

Sendo assim, o índice de confiabilidade descreve a estabilidade do talude pelo número de desvios de padrões que separam o fator médio de segurança do seu valor de falha, este definido como 1. O índice de confiabilidade, também pode ser definido como uma forma de normalizar o fator de segurança em relação à sua incerteza. A Equação 2, apresenta o cálculo para a determinação do índice de confiabilidade.

$$\beta = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \quad (2)$$

Onde β representa o índice de confiabilidade, μ_{FS} o fator de segurança médio e σ_{FS} o desvio padrão do fator de segurança. A Tabela 1 ilustra a relação entre o índice de

confiabilidade e a probabilidade de falha, supondo uma distribuição normal para o fator de segurança.

A variabilidade dos parâmetros é dada em função do coeficiente de variação (COV). Duncan et al. (2014) define o COV como sendo a relação entre o desvio padrão (σ) e a média aritmética (μ) de uma amostra, portanto, este parâmetro designa a dispersão dos dados em relação à média, sendo o seu resultado expresso em porcentagem (Eq. 3).

$$COV = \frac{\sigma}{\mu} * 100 \quad (3)$$

Tabela 1: Nível de desempenho esperado de acordo com valores do índice de confiabilidade e probabilidade de falha.

Nível de Desempenho Esperado	Índice de Confia. (β)	Probabilidade de Falha (P_f)
Alto	5.0	0.0000003
Bom	4.0	0.00003
Acima da média	3.0	0.001
+/-Abaixo da Média	2.5	0.006
Pobre	2.0	0.023
Insatisfatório	1.5	0.07
Perigoso	1.0	0.16

Fonte: Adaptado de U.S Army Corps Engineers (1995).

No Método de Monte Carlo (MMC) a estabilidade da estrutura é calculada a partir da geração de um grande número de dados aleatórios para as variáveis de entrada (como o ângulo de atrito e a coesão), uma vez que a distribuição de probabilidade de tais variáveis é conhecida. À medida que os dados são gerados, a estabilidade é analisada por métodos determinísticos, o que também permite determinar as medidas de tendência central correspondentes ao fator de segurança, bem como a probabilidade correspondente de falha (Cho, 2010).

Há dois aspectos importantes a considerar no MMC. O primeiro refere-se à procura da superfície crítica para cada conjunto de valores de entrada de dados gerados aleatoriamente, o que envolve significativo esforço computacional, tornando-se pouco prático. A maneira comumente usada para resolver essa dificuldade é tomar como superfície de ruptura crítica aquela obtida pelo método determinístico, portanto independe dos valores do conjunto de dados de entrada da análise probabilística (El Ramly, 2001).

De acordo com Li et al. (2013) a probabilidade de falha do sistema ($P_{f,s}$) é frequentemente calculada usando um número grande, mas finito, de superfícies de deslizamento potenciais. Sejam, S_1 , S_2 , ..., S_{N_s} as N_s superfícies de deslizamento potenciais que são consideradas na análise de equilíbrio limite da estabilidade de taludes. Então, o talude pode ser considerado como um sistema em série que consiste em N_s componentes (ou seja, S_1 , S_2 , ..., S_{N_s}). A falha do sistema ocorre quando qualquer componente (ou seja,

$S_1, S_2, \dots, S_{N_s}$) falha. A probabilidade de falha do sistema ($P_{f,s}$) pode ser calculada através da Equação 4.

$$P_{f,s} = \frac{1}{N_t} * \sum_{k=1}^{N_t} I(FS_{min} > 1) \quad (4)$$

Onde N_t é o número total de simulações geradas durante o MCS; FS_{min} valor mínimo do fator de segurança entre os valores de fator de segurança para o N_s superfícies de deslizamento potenciais para um dado conjunto de amostras aleatórias de parâmetros incertos X (como c_u , c e $\emptyset$) envolvidos na análise de estabilidade de taludes; e $I\{\}$ é o indicador de função. Para uma dada amostra aleatória $I(FS_{min} > 1)$ é tomado como valor de 1 quando $FS_{min} > 1$ ocorrer. Caso contrário, é igual a zero.

A superfície de deslizamento com FS_{min} (isto é, superfície de deslizamento crítica) precisa estar localizada entre superfícies de deslizamento potenciais para cada amostra gerada durante o MCS, e seu correspondente é calculado usando um método de análise de estabilidade de talude determinístico, como métodos de equilíbrio limite (Duncan et al. 2014).

O método do Segundo Momento de Primeira Ordem (First-Order, Second Moment ou FOSM) se baseia no truncamento da função de expansão da Série de Taylor. Segundo Griffith (2007), este método fornece aproximações analíticas para a média e o desvio padrão de um parâmetro de interesse, como uma função da média e desvio padrão dos vários fatores de entrada, e suas correlações.

Assim, o cálculo é desenvolvido a partir da variação do FS motivada por uma pequena oscilação nas variáveis independentes. O número de análises necessário para o procedimento é igual a $n+1$, onde n é o número de valores independentes. A Equação 5 apresenta este processo.

$$V[FS] = \sum_{i=0}^n \left(\frac{\delta FS_{ii}}{\delta X_{ii}} \right)^2 * V[X_i] \quad (5)$$

Onde $V[FS]$ equivale à variância do FS, δFS_{ii} corresponde à variância do FS quando as variáveis do estudo são variadas em δX_i e $V[X_i]$ significa a variância de cada uma das variáveis (X_i).

2.4 Análise de estabilidade através do Software Slide 6.0

O software Slide 6.0 emprega o MEL para a análise de estabilidade global, podendo esta ser uma análise tanto determinística quanto probabilística. A análise probabilística, é realizada através da aplicação do Método de Monte Carlo, de modo que, a fim de otimizar a demanda computacional, o software possibilita que esta análise seja realizada de duas formas, a Global Minimum e a Overall Slope.

Na análise Global Minimum a variabilidade dos parâmetros é aplicada apenas para a superfície de ruptura crítica, em contra partida, a análise do tipo Overall Slope considera a variação dos parâmetros para todas as superfícies de ruptura. Sendo assim, o presente estudo se atentará em analisar unicamente a análise Overall Slope.

A análise de estabilidade, através do Método de FOSM, foi realizada com o auxílio dos softwares Slide 6.0 e Excel. Primeiramente, foram realizadas análises determinísticas para cada uma das variações de parâmetros exigidos pelo método e posteriormente, realizado o emprego das equações no software Excel. Com base nessa metodologia, é possível identificar quais parâmetros têm maior influência sobre o fator de segurança.

2.5 Análise de estabilidade através do Software PLAXI 2D

A análise foi realizada com o auxílio do software PLAXI 2D, através do Método de Elementos Finitos foi calculado os Fatores de Segurança de cada um dos cenários estudados. Para isto, primeiramente foi realizado um estudo de malha. Este estudo tem como principal objetivo identificar o modelo de análise mais otimizado, isto é, aquele modelo que necessite da menor demanda computacional possível para apresentar os resultados mais assertivos possíveis.

Para gerar a malha de elementos finitos é necessário dividir em várias partes o elemento, para a análise bidimensional, são gerados vários triângulos que passam a representar o domínio da simulação. Nas propriedades gerais do PLAXI 2D é definido o número de nós a analisar por triângulo do elemento. Onde existe a opção de usar uma análise com 6 e 15 nós por elemento, neste estudo adotou-se o emprego de 15 nós.

Posteriormente, deu-se início a análise na qual identificou-se que a malha fina e muito fina são as que apresentam os resultados mais assertivos, na Tabela 5 são retratados os resultados da análise de malha. Nota-se que apesar da malha muito grossa não apresentar convergência sobre o fator de segurança, a diferença entre o resultado obtido pela malha muito grossa e a malha muito fina, é menor do que 1%. A partir desta análise, optou-se por realizar todas as análises com a malha muito fina.

Tabela 2: Análise de malha do MEF.

Tipo de Malha	Número de Elementos	Fator de Segurança
Muito Grossa	5351	1,658
Grossa	6665	1,656
Média	7787	1,649
Fina	10279	1,644
Muito Fina	14057	1,644

3 CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS E CENÁRIOS ANALISADO

Mediante de um resgate histórico no acervo técnico do Porto de Rio Grande, foi encontrado além do projeto da estrutura do Cais do Porto Velho, 12 ensaios de sondagem, estes do tipo Standard Penetration Test (SPT). A Figura 3 identifica o local de cada um dos ensaios. Devido o cabeço 13 ser o local em que as manifestações patológicas são mais intensas, percebe-se que este também é o local em que há um maior número de ensaios.

A partir da análise dos boletins de sondagem, pode-se perceber uma similaridade grande entre os mesmos. Ao analisar os ensaios SP1, SP1A e SP1B, nota-se que todos apresentam uma camada de aproximadamente 3m de areia onde a sondagem é interrompida, uma vez que alcança uma camada impenetrável, isso ocorre porque nestes pontos onde o ensaio foi realizado encontra-se a estrutura do enrocamento do tardoz do cais. Já o ensaio SP1C avança para camadas mais profundas, neste boletim é possível identificar as demais camadas de solo do local, a Figura 4 apresenta o resultado do boletim de sondagem SP1B, que é similar aos boletins SP1 e SP1A, e SP1C. Assim, com base nestes ensaios foi definido o perfil geotécnico do local.

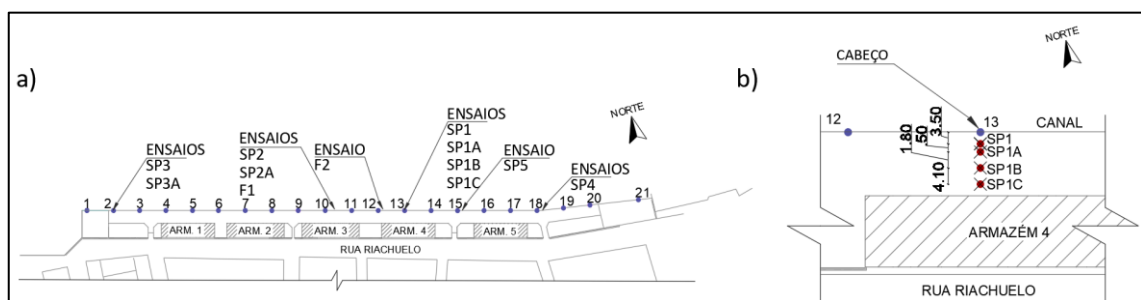


Figura 3: Investigação geotécnica a) locais dos testes SPT ao longo do cais; b) Identificação dos furos à frente do cabeço de amarração 13.

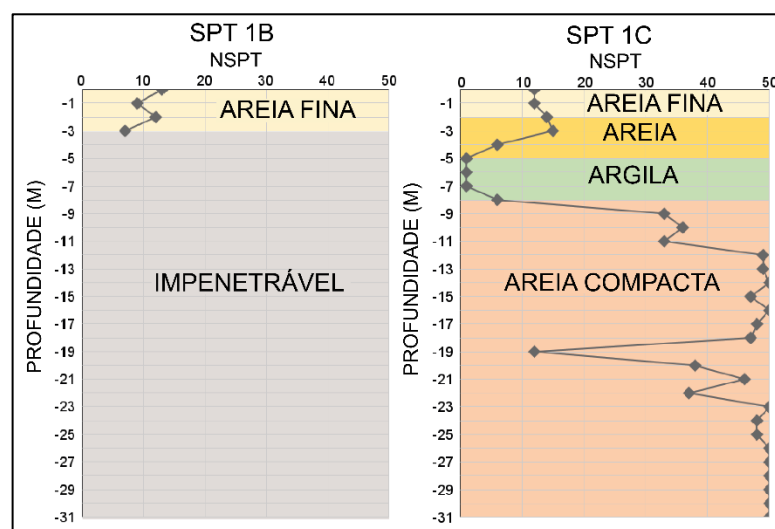


Figura 4: Resultados do perfil do solo dos ensaios SP1B e SP1C, realizados em frente ao cabeço de amarração 13.

A partir da aplicação de equações empíricas, que correlacionam o número NSPT com as propriedades do mesmo, foram definidos os parâmetros geotécnicos médios do solo que compõem a estrutura do Cais. Os parâmetros do enrocamento foram os mesmos empregados nos estudos de Meirelles (2008).

Sendo assim, para o presente estudo, será considerada uma variabilidade alta dos parâmetros geotécnicos, uma vez que em estudos anteriores já foi realizada a análise de como o COV influencia sobre a estabilidade da estrutura, onde foi possível observar que COV maiores apresentam probabilidades de falha e índices de confiabilidade mais conservadores. Portanto, os desvios padrão de cada um dos parâmetros geotécnicos foram calculados com base na definição do coeficiente de variação (Eq. 3). A Tabela 3 ilustra os valores adotados para cada um dos parâmetros em função das análises realizadas. Através do resgate histórico das obras e do projeto do cais, foi possível definir o layout da estrutura. Através da sobreposição destas informações com os resultados dos ensaios SPT, foi definida a seção transversal do Cais do Porto Velho.

Tabela 3: Parâmetros geotécnicos para do MEL.

Solo	Parâmetros	Média	COV (%)	Desvio Padrão	Monte Carlo		FOSM
					Relativo Mínimo	Relativo Máximo	Média + Variação de 10%
Solo 1:	γ (kN/m ³)	19	10	1,9	13,3	24,7	20,9
Areia Fina	ϕ (°)	35	15	5,25	19,25	50,75	38,5
Solo 2:	γ (kN/m ³)	18	10	1,8	12,6	23,4	19,8
Areia	ϕ (°)	29	15	4,35	15,95	42,05	31,9
Solo 3:	γ (kN/m ³)	15	10	1,5	10,5	19,5	16,5
Argila	Su (kPa)	25	30	7,5	2,5	47,5	27,5
Solo 4:	γ (kN/m ³)	20	10	2	14	26	22
Areia Compacta	ϕ (°)	35	15	5,25	19,25	50,75	38,5
Solo 5:	γ (kN/m ³)	18	10	1,8	12,6	23,4	19,8
Filtro (Areia)	ϕ (°)	29	15	4,35	15,95	42,05	31,9
Enrocamento	γ (kN/m ³)	30					
	ϕ (°)	45					

Tabela 4: Parâmetros geotécnicos para do MEF.

Material	Valores Médios dos Parâmetros				
	Peso Específico (kN/m ³)	Ângulo de Atrito (°)	Resistencia Não-Drenada (Kpa)	Módulo de Elasticidade (kPa)	Coef. de Poisson
Solo 1: Areia Fina	19	35	-	2,00E+04	0,3
Solo 2: Areia	18	29	-	1,50E+04	0,3
Solo 3: Argila	15	-	25	7000	0,4
Solo 4: Areia Compacta	20	35	-	5,00E+04	0,35
Solo 5: Filtro (Material Não identificado)	18	29	-	1,50E+04	0,3
Enrocamento	30	45		1,56E+05	0,3

Sendo assim, é proposto a análise de 4 cenários, em que o cenário 1 representa a estrutura original sem avarias, considerando apenas a variabilidade do solo e de seus respectivos parâmetros, além disto, o solo de proteção do enrocamento é caracterizado com areia compacta. Com o objetivo de compreender como o solo de proteção do enrocamento influencia na estabilidade da estrutura, considerou-se que tal solo seja argiloso, assim este novo cenário foi atribuído como cenário 2.

Conforme observado em levantamento de mergulho realizado pela SUPRG (2016), observou-se a existência de uma erosão na base do enrocamento de proteção do muro, sendo assim definiu-se esta situação como cenário 3 para este estudo. Por fim, o cenário 4 é representado como uma evolução do cenário 3, em que é observado a erosão de parte do enrocamento de proteção do cais. A Figura 5 ilustra a seção do cais para os distintos cenários analisados.

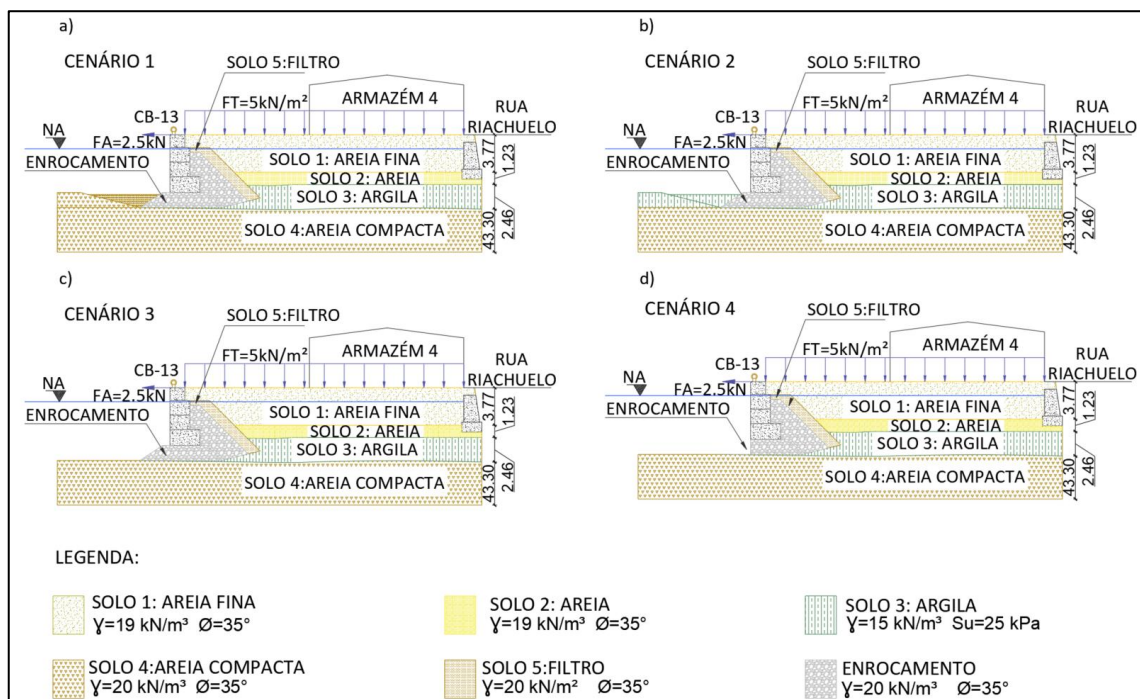


Figura 5: a) Cenário 1: o solo de proteção do enrocamento sendo areia; b) Cenário 2: o solo de proteção do enrocamento sendo argila; c) Cenário 3: erosão do solo de proteção do enrocamento; d) Cenário 4: erosão do enrocamento e parte da base da estrutura do cais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise Probabilística

Por meio dos resultados da Tabela 5, observa-se a evolução do fator de segurança para cada um dos cenários analisados. Nota-se que o cenário 1 apresentou um fator de segurança maior do que 2, probabilidades de falhas muito pequenas e índices de confia-

bilidades altos, o mesmo pode ser percebido para o cenário 2. Conforme as análises evoluem para os cenários 3 e 4 observa-se que os valores do fator de segurança são menores do que 2 e maiores do que 1,8, probabilidade de falha pequena e um índice de confiabilidade próximo de 3, que de acordo com a Tabela 1, caracteriza um índice de confiabilidade acima da média. Assim, observa-se que uma diminuição de 20% do valor do fator de segurança quando ocorre a perda da base do enrocamento. Também é possível notar que o valor do fator de segurança segundo a análise probabilística, é maior que os valores encontrados na análise determinística, isto ocorre porque a análise probabilística considera a variabilidade dos materiais.

A fim de compreender como a variabilidade do solo influência sobre os fatores de segurança encontrados pelo MEF, realizou-se uma análise probabilística da mesma. É importante enfatizar que esta análise foi realizada a partir dos fatores de segurança calculados considerando o critério de resistência do enrocamento como Mohr-Coulomb.

Tabela 5: Resultado da análise probabilística.

MÉTODO	CENÁRIO 01			CENÁRIO 02			CENÁRIO 03			CENÁRIO 04		
	$\overline{FS}$	Pf	β	$\overline{FS}$	Pf	β	$\overline{FS}$	Pf	β	$\overline{FS}$	Pf	β
DET	2,204	-	-	2,289	-	-	1,845	-	-	1,778	-	-
MMC	2,46	1,00E-05	4,261	2,365	2,00E-05	4,046	1,985	4,00E-04	3,345	1,93	5,00E-04	3,3
FOSM	2,348	9,00E-06	4,281	2,289	2,00E-06	4,567	1,915	3,00E-05	4,029	1,849	2,00E-04	3,54

4.2 Método dos Elementos Finitos

Deve-se pontuar que ao longo da análise, percebeu-se que os valores dos fatores de segurança encontrados eram inferiores aos valores dos fatores de segurança encontrados pelo Método de Equilíbrio Limite. Com o objetivo de compreender o motivo de tal disparidade, foi realizada uma série de mudanças nos parâmetros de entrada a fim de identificar quais propriedades afetaria de modo significativo o fator de segurança, a seguir são apresentadas estas alterações no modelo:

- Inserção de interfaces de interação solo estrutura;
- Aumento exponencial dos módulos de elasticidade;
- Atualização da malha a cada nova etapa de análise;
- Remoção das cargas distribuída e pontual;
- Mudança do critério de resistência do enrocamento passando de Mohr Coulomb para Linear Elástico;

Em vista de todas estas alterações, a única que repercutiu de forma significativa foi a mudança do critério de ruptura. A Tabela 6 apresenta um comparativo dos valores dos fatores de segurança encontrados considerando o critério de ruptura do enrocamento como sendo Mohr- Coulomb e Linear Elástico para o MEF. Na tabela em questão, tam-

bém são apresentados os resultados da análise determinística do MEL. A Tabela 7 apresenta as superfícies de ruptura dos Cenários 1,2 e 3 considerando o Método de Equilíbrio Limite e o Método dos Elementos Finitos, respectivamente.

Tabela 6: Comparação dos resultados dos MEL e MEF.

Cenários	MEF		MEL
	Mohr Coulomb	Linear Elástico	Morgenstern & Price
1	1,646	2,903	2,204
2	1,604	2,647	2,289
3	1,071	2,005	1,84
4	-	1,538	1,778

A partir destes resultados, entende-se que o MEL, tem como premissa a definição do fator de segurança a partir do equilíbrio entre aos esforços solicitantes e os esforços resistentes desenvolvidos ao longo da análise. Em contra partida, o MEF, considera a interação entre os elementos da estrutura, de modo que estes respondem diretamente na relação de tensão-deformação da mesma. Portanto, ao adotar um critério de resistência do enrocamento como sendo Linear Elástico, é possível notar que o sistema se comporta de uma forma muito semelhante ao encontrado na análise de MEL, em vista que o critério de resistência linear elástico confere ao enrocamento uma rigidez muito grande, similar ao que é reproduzido no software Slide, onde é realizada a análise do MEL, no qual não é levada em conta o módulo de deformação dos materiais, assim como a interação entre os mesmos.

Esta análise pode ser observada ao comparar os resultados dos fatores de segurança entre o MEL e o MEF (Linear Elástico). Nota-se que os valores são muito próximos, além disto, na Tabela 7 é possível verificar as zonas de ruptura da estrutura. Percebe-se que a superfície crítica de ruptura do MEL é muito próxima da zona de plastificação do MEF adotando o modelo Linear Elástico.

Ao adotar o critério de resistência do enrocamento como sendo Mohr-Coulomb, nota-se uma redução significativa do fator de segurança. Isso ocorre porque nesta análise, o enrocamento passa a ter critério de resistência mais realista, de modo que a carga referente ao esforço de amarração passa provocar uma relação de tensão-deformação que repercute diretamente no valor do fator de segurança, o que não ocorre na análise do MEL.

Sendo assim, entende-se que o software PLAXIS 2D, reproduz de forma satisfatória a análise de estabilidade da estrutura de modo que quando inferidos critérios de análises similares, os resultados encontrados são muito próximos aos calculados por meio do software SLIDE. Contudo deve-se destacar que as metodologias de análise são muito distintas, de modo que ao aplicar um critério de ruptura da estrutura mais realista, tem-se como resultado da análise, fatores de segurança que apresentam valores inferiores aos calcula-

dos pelo MEL. Isso ocorre pelo fato de que o MEF, considera uma gama maior de parâmetros na sua análise. Além disto, este método também leva em consideração os esforços horizontais atuantes na estrutura, o que não ocorre no MEL.

A fim de compreender como a variabilidade do solo influência sobre os fatores de segurança encontrados pelo MEF, realizou-se uma análise probabilística da mesma. É importante enfatizar que esta análise foi realizada a partir dos fatores de segurança calculados considerando o critério de resistência do enrocamento como Mohr-Coulomb.

A Tabela 8 apresenta os resultados da análise de FOSM. Nesta, nota-se que o fator de segurança apresentado é menor que o fator de segurança encontrado no Método de FOSM para o MEL. Entretanto para as duas análises é possível perceber que conforme é aplicada a variabilidade dos parâmetros geotécnicos observa-se uma redução do índice de confiabilidade. Ao relacionar os resultados da Tabela 7 com os resultados da análise de FOSM para o MEL, percebe-se que o índice de confiabilidade é muito similar ao encontrado pelo MEL.

Tabela 7: Comparação das superfícies de ruptura dos MEL e MEF.

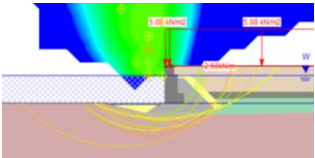
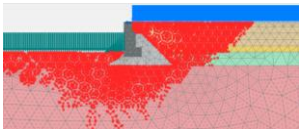
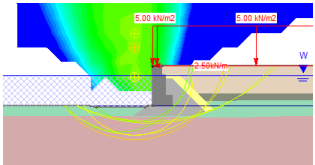
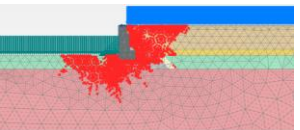
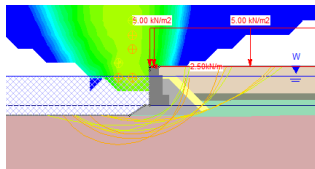
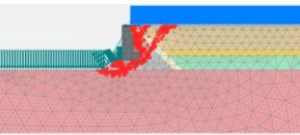
Cenário	Método do Equilíbrio Limite	Método de Elementos Finitos	
		Enrocamento Linear Elástico	Enrocamento Mohr-Coulomb
1			
2			
3			

Tabela 8: Resultados do Método de FOSM para o MEF.

Cenário	Método de Análise	$\overline{FS}$	Pf	β
1	Phi/c-reduction	1,646	8E-05	4,175
2		1,604	6E-06	4,392
3		1,071	7E-05	3,799

5 CONCLUSÃO

A partir do presente estudo é possível compreender como a estabilidade do Cais do Porto Velho é influenciada pela variabilidade dos parâmetros geotécnicos, assim como a probabilidade de falha de cada um dos cenários analisados. Além disto, foi possível verificar a evolução do fator de segurança à medida em que ocorre a perda da estrutura da base do cais.

Através da aplicação das análises de probabilidade para o Método do Equilíbrio Limite foi possível notar uma convergência entre os resultados encontrados para os Métodos de Monte Carlo e FOSM.

Através da análise do Método dos Elementos Finitos foi possível notar que a adoção do critério de resistência do enrocamento com sendo Linear Elástico resultou em uma área de plastificação muito parecida com as áreas das superfícies críticas de ruptura encontradas no Método do Equilíbrio Limite, além de apresentar valores de fatores de segurança muito próximos. Entretanto ao adotar o critério de resistência do enrocamento como sendo Mohr Coulomb os fatores de segurança apresentaram valores muito inferiores aos calculados pelo Método do Equilíbrio Limite. No que diz respeito ao Cenário 4, o MEF identificou a ruptura da estrutura neste estágio.

Diante dos fatos expostos, pode-se notar que a variabilidade dos parâmetros influencia diretamente na probabilidade de falha da estrutura assim como no índice de confiabilidade da mesma. Além disto, pode-se entender que a estabilidade do Cais do Porto Velho é influenciada tanto pela perda do solo de proteção da base do enrocamento quanto pela erosão da base do enrocamento propriamente dito.

Através da presente pesquisa pode-se constatar que para a configuração da seção do Cais do Porto Velho, o Método de Elementos Finitos, apresentou resultados mais assertivos quando comparado aos resultados inferidos pelo Método de Equilíbrio Limite. Isto porque o MEF leva em consideração a interação entre os elementos assim como a rigidez dos mesmos. Através das análises realizadas e dos resultados apresentados, identificou-se que o critério de resistência do enrocamento apresenta uma grande influência sobre o fator de segurança.

Ademais o MEF identificou a ruptura da estrutura do cais, a partir do momento em que ocorre a perda da base do enrocamento. Esta conformação também é observada na estrutura existente do Cais do Porto Velho. Sendo assim, supõem-se que as deformações encontradas no local sejam oriundas da perda da base do enrocamento.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Rio Grande e ao Porto do Rio Grande por compartilhar seu acervo técnico viabilizando que esta pesquisa fosse realizada.

REFERÊNCIAS

- Acervo Técnico SUPRG (2016). Relatório de inspeção das manifestações patológicas ao longo da estrutura do Cais do Porto Velho.
- CHO, Sung Eun. Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, v. 136, n. 7, p. 975-984, 2010.
- Christian J., Ladd C., Baecher G. (1994), Reliability applied to slope stability analysis. *Journal of Geotechnical Engineering* 120 (12): 2180–2207.
- Corps of Engineers, Engineering and Design Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering, Engineering Technical Letter N 1110-2-547, Department of the Army, U. S., Washington, DC. 1997
- Da Re, G., GERMAINE, J. T, LADD, C. C. (2001) Physical Mechanisms Controlling the Pre-Failure Stress-Strain Behavior of Frozen Sand. Massachusetts Inst Of Tech Cambridge Dept Of Civil And Environmental Engineering
- Ditlevsen, O. (1979). “Narrow reliability bounds for structural systems.” *J. Struct. Mech.*, 7(4), 453–472
- Duncan, J. M., and Wright, S. G. (2014). *Soil strength and slope stability*, Wiley, Upper Saddle River, NJ.
- El-Ramly, H. Probabilistic Analyses of Landslide Hazards and Risks: Bridging Theory and Practice. 2001. PhD. Thesis, University of Alberta, Canada, 2001.
- Griffiths D V and Lane P A 1999 Slope stability analysis by finite elements *Geotechnique* 49 3 387-403
- GRIFFITHS, D. V. & FENTON, G. A. (2007). Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering. *Internacional Centre For Mechanical Sciences*, New York, p. 71-112.
- Jiang, S., Huang, J., Griffiths, D.V., & Deng, Z. (2022). Advances in reliability and risk analyses of slopes in spatially variable soils: a state-of-the-art review. *Computers and Geotechnics*, 141, 104498. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104498>.
- MEIRELLES M. C. (2008). Determinação da resistência ao cisalhamento de enrocamento da UHE Machadinho através de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.
- Ortigão, J. A. R.; Sayão, A. S. F. J. *Handbook of slope stabilisation*. Springer -Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- PHOON K. K. & KULHAWY F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*.

- PLAXIS 2D (2016). Plaxisbv, Delft, Netherlands.
- Queiroz, I. M. (2016). Comparison Between Deterministic and Probabilistic Stability Analysis, Featuring a Consequent Risk Assessment. *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*. Vol:10, No:6.
- Vanmarcke, E. H. (1977). “Probabilistic modeling of soil profiles.” *J. Geotech. Engrg. Div.*, 103(11), 1227–1246.
- Zaman M., Booker, J. R. and Gioda, G. (2000), *Modeling in Geomechanics*, John Wiley and Sons, U.K.
- Li, L., Wang, Y., Cao, Z., and Chu, X. (2013). “Risk de-aggregation and system reliability analysis of slope stability using representative slip surfaces.” *Comput. Geotech.*, 53(Sep), 95–105.