

6

Exemplos de Aplicação

Neste capítulo são apresentados exemplos elaborados para que todas as propostas teóricas descritas nos capítulos 2, 3 e 4 sejam validadas. Programas em linguagem MATLAB foram desenvolvidos para o estudo da estabilidade de taludes. Um programa foi gerado para a determinação da variação da sucção em solos não saturado; outro código numérico foi desenvolvido para a solução do problema de Análise Limite no espaço cônico quadrático, e finalmente um último programa foi também escrito em MATLAB para a determinação do índice de confiabilidade.

Para a geração de malhas de elementos finitos utilizados nos exemplos de aplicação é utilizado o programa de pré-processamento GID. Para visualização dos resultados foram utilizados diversos comandos do programa MATLAB.

6.1.

Encosta de Coos Bay

O primeiro exemplo de aplicação é a encosta de Coos Bay, este problema é apresentado no trabalho de Borja et al. (2010 e 2012). O exemplo consiste no estudo do deslizamento acontecido no campo experimental instrumentado, Coos Bay (CB), que era um "laboratório" em grande escala utilizado para a realização de experimentos hidrológicos. O talude CB sofreu deslizamentos, devido a uma forte chuva acontecida em novembro de 1996. O solo superficial da encosta é um colúvio, derivada do intemperismo da rocha localizado a apenas 1,5 – 2 m de profundidade.

A figura 6.1 apresenta a geometria da encosta CB. A região em verde corresponde a solo coluvionar e a cinza corresponde à rocha.

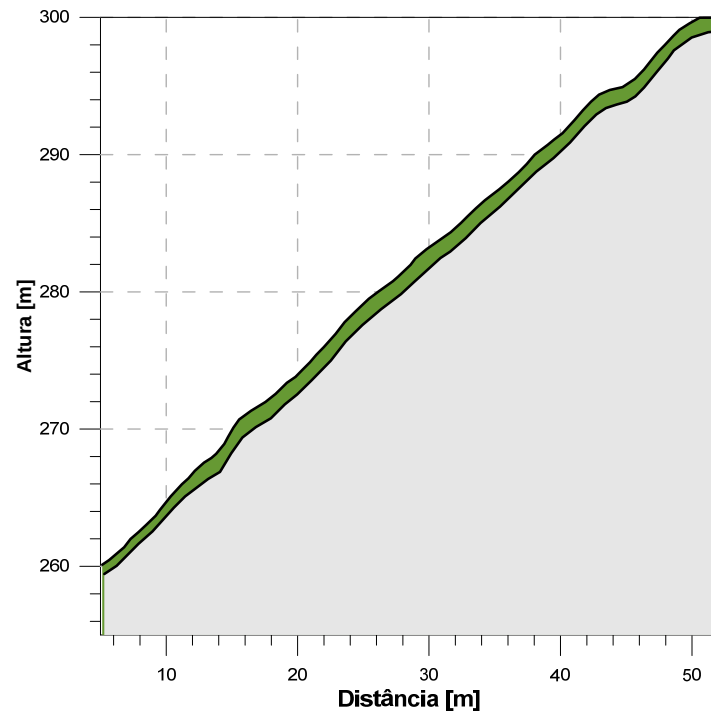


Figura 6.1 – Geometria da encosta Coos Bay.

A malha de elementos finitos utilizada é apresentada na figura 6.2, com 3624 elementos e 4086 nós.

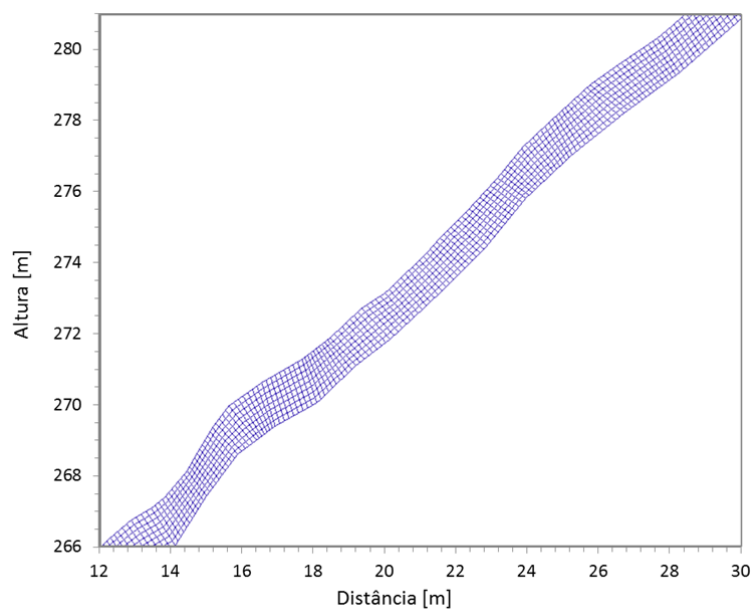


Figura 6.2 – Seção da malha de elementos finitos da encosta Coos Bay.

O solo não saturado é submetido a uma frente de umedecimento devido à chuva. É assumido fluxo nas regiões saturadas e não saturadas, estas são regidas pela curva de característica que utiliza o modelo de van Genuchten para definir a relação entre sucção e umidade volumétrica assim como a relação sucção e a condutividade hidráulica.

As condições de contorno da encosta Coss Bay são: a borda inferior no contato solo-rocha é considerada como impermeável (fluxo de água igual a zero), na borda lateral na parte superior a condição de borda assumida é impermeável, no pé do talude a condição de contorno é de fluxo zero quando a borda está não saturada e de carga de pressão zero quando saturada (*seepage face*) e na borda superior a condição de contorno é de precipitação prescrita.

A condição inicial da encosta é considerada constante em toda a geometria, o valor da carga de pressão inicial é de -1,5 kPa, a condutividade hidráulica saturada foi assumida de 1.3 m/h.

As curvas característica e a de condutividade hidráulica do solo no talude estão apresentadas na figura 6.3.

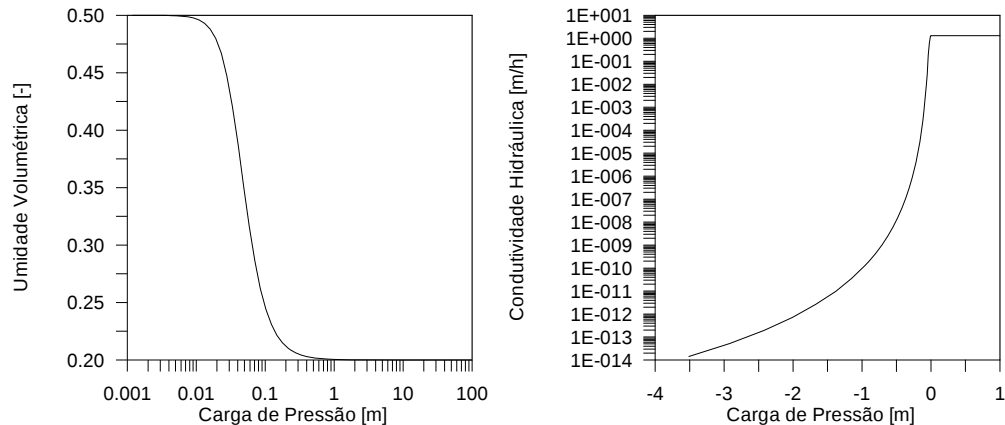


Figura 6.3 – Curvas característica e de condutividade hidráulica.

A Figura 6.4 mostra o histograma de precipitações da encosta CB e a do o aeroporto de Oregon que se localiza nas proximidades, durante a semana de chuvas intensas.

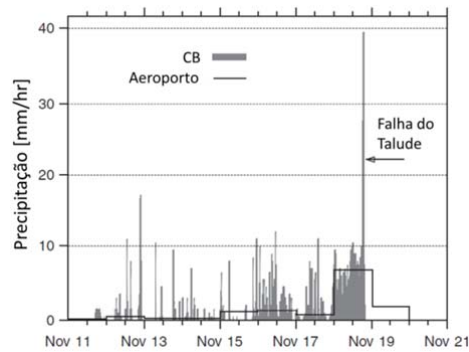


Figura 6.4 – Histograma da precipitação ocorrida na encosta CB em 1996
(Adaptado de Borja et al., 2012).

O histograma de precipitações mostrado na Figura 6.4 indica uma taxa de precipitação máxima de 40 mm/h. Considerando que ignoramos os efeitos da geometria tridimensional nas simulações, Borja et al. (2012) considerou três cenários simplificados de precipitações que correspondem ao histograma apresentado na Figura 6.4. Também foram investigadas diversas condições de contorno na análise de fluxo saturado–não saturado, isto é, a possibilidade de utilizar a condição de borda do tipo *seepage face* ao longo de um segmento no contato solo-rocha para verificar seu efeito sobre a estabilidade do talude.

Os três cenários de precipitações propostos por Borja et al. (2012) são apresentados a seguir: o primeiro cenário é uma sequência de chuvas uniformes de 6 mm/h durante as primeiras 24h, seguido de uma chuva de 40 mm/h por mais 1,7 h; o segundo cenário considera uma precipitação em 14 mm/h para 13,6 h seguido de outra precipitação de 50mm/h para 2,5 h; o terceiro cenário estabelece uma precipitação de 100 mm/h durante 2,5 h.

Borja et al. (2012) investigaram o efeito que produz a presença de rocha fraturada na estabilidade de taludes. Para este fim utilizou-se a condição de contorno que permite o passo da água após saturar o solo (*seepage face*), esta condição de borda é localizada entre as elevações 265 e 275m. Esta condição de borda foi utilizada somente no terceiro cenário de precipitação.

Os resultados da análise de fluxo saturado e não saturado são apresentados a seguir:

- Cenário 1 precipitação de 6 mm/h durante 24 h e mais 40 mm/h por mais 1,7 h.

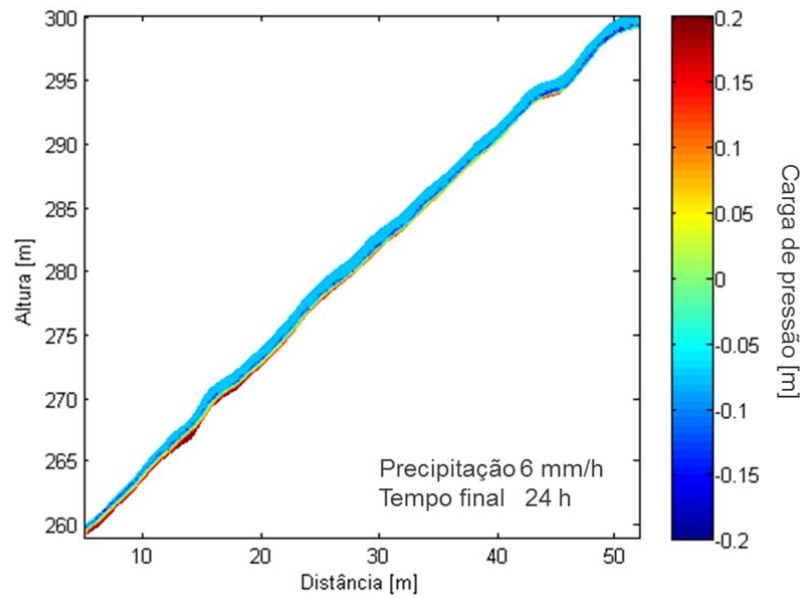


Figura 6.5 – Variação da carga de pressão no tempo 24 horas do cenário de precipitações 1.

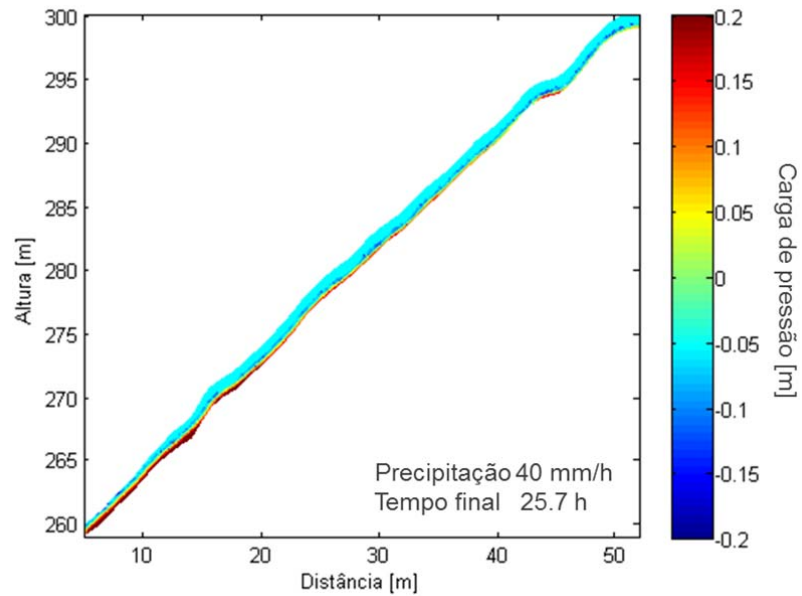


Figura 6.6 – Variação da carga de pressão no tempo 25.7 horas do cenário de precipitações 1.

- Cenário 2: precipitação de 14 mm/h durante 13,6 h e 50 mm/h por mais 2,5 h.

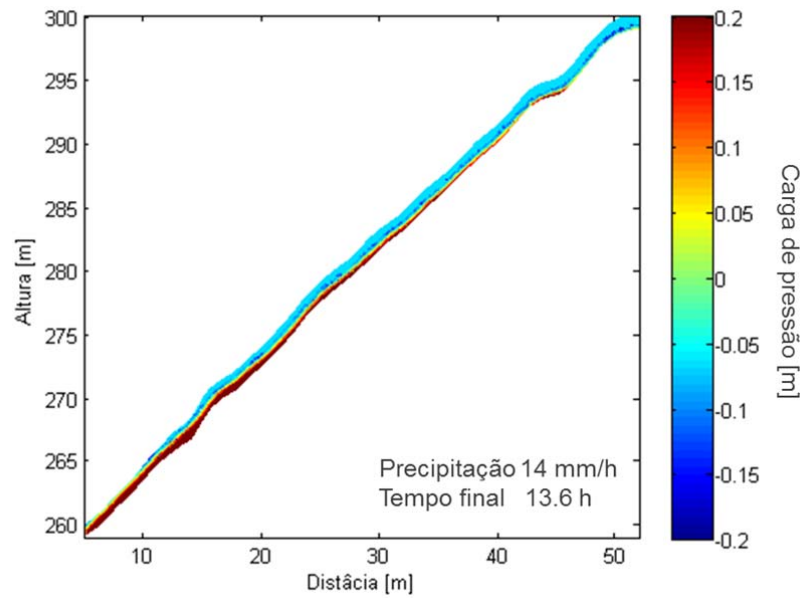


Figura 6.7 – Variação da carga de pressão no tempo 13.6 horas do do cenário de precipitações 2.

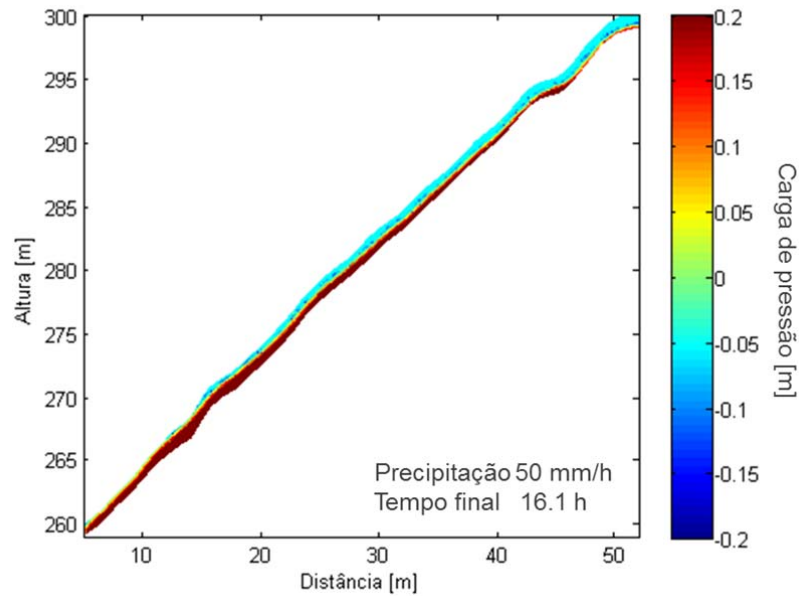


Figura 6.8 – Variação da carga de pressão no tempo 16.1 horas do cenário de precipitações 2.

- Cenário 3, precipitação de 100 mm/h durante 2,5 h, e considerando ainda a condição de contorno de “*seepage face*” na região indicada na figura 6.9.

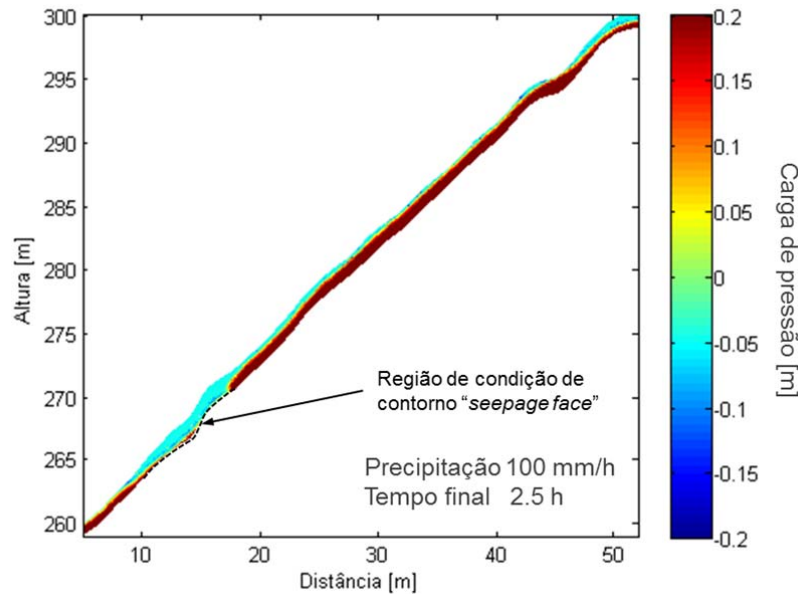


Figura 6.9 – Variação da carga de pressão no tempo 2.5 horas do caso 3.

A partir dos resultados obtidos na análise de fluxo e conjuntamente com os parâmetros de resistência do solo é realizada a análise determinística utilizando a análise limite no espaço cônico quadrático.

Os parâmetros de resistência utilizados foram obtidos em ensaios de laboratório descritos em Borja et al. (2010 e 2012). A coesão tem o valor de 4 kPa e o ângulo de atrito igual a 40° , ainda um ângulo ϕ_b igual a 15° é sugerido em Borja et al. (2012).

Borja et al. (2012) empregam dois métodos de análise de estabilidade de taludes: O método de Spencer e o método de Bishop modificado. Borja et al. (2012) utilizaram o programa comercial SLOPE / W para procurar a superfície de ruptura mais crítica e calcular o fator de segurança correspondente.

Neste trabalho são determinados os fatores de segurança ao colapso (FS) utilizando o método de análise limite no espaço cônico quadrático. Na análise limite a condição de resistência considerada é o critério de resistência em solos

não saturados formulado por Fredlund et al. (1978) (equação 2.11). Também é utilizada a técnica de redução de progressiva (ver o item 4.8.1) proposto por Zienkiewicz (1975) para os parâmetros de resistência c' e ϕ' .

A seguir são apresentados os resultados dos FS obtidos utilizando a Análise Limite no espaço cônico quadrático. Esses resultados são então comparados com os encontrados em Borja et al. (2012).

Tabela 6.1 – Resultados da Análise Limite para o cenário de precipitação 1.

Cenário de precipitação 1		
	Tempo = 24 h 6 mm/h	Tempo = 1.7 h 40 mm/h
Método de Equilíbrio Limite (Borja, 2012).	1.26	1.12
Método de Análise Limite no espaço cônico quadrático.	1.28	1.18

Tabela 6.2 – Resultados do Análise Limite para o cenário de precipitação 2.

Cenário de precipitação 2		
	Tempo = 13.6 h 14 mm/h	Tempo = 2.5 h 50 mm/h
Metodo de Equilíbrio Limite (Borja, 2012).	1.03	1.03
Método de Análise Limite no espaço cônico quadrático.	1.10	0.98

Tabela 6.3 – Resultados do Análise Limite para o cenário de precipitação 3.

Cenário de precipitação 3	
	Tempo = 2.5 h 100 mm/h
Método de Equilíbrio Limite (Borja, 2012).	1.02
Método de Análise Limite no espaço conico quadrarico.	1.06

A seguir é realizada a análise de confiabilidade com o objetivo de determinar o índice de confiabilidade β nos três casos propostos.

A função de falha é estabelecida para as variáveis aleatórias c' e ϕ' . Assim: $g(c', \phi') = \Theta(c', \phi') - 1 \leq 0$.

As propriedades do desvio padrão das variáveis aleatórias são adotadas pelo que é sugerido pela JCSS (2006), apresentadas na tabela 6.4 a seguir:

Tabela 6.4 - Desvios padrões indicativos das propriedades do solo (Adaptado de JCSS, 2006).

Propriedade do solo	Desvio padrão [% do valor médio esperado]
Peso específico [kN/m ³]	5 - 10 %
Ângulo de atrito (ϕ') [°]	10 - 20 %
Coesão (c') [kN/m ²]	10 - 50 %

Então, as propriedades das variáveis aleatórias c' e ϕ' são:

Tabela 6.5 - Propriedades das variáveis aleatórias da encosta Coos Bay.

Variável	Média (μ_{x_i})	Desvio padrão (σ_{x_i})
ϕ'	40 °	10%
c'	4,0 kPa	20%

Utilizando as propriedades da Tabela 6.5 são geradas 25 combinações de c' e ϕ' , nos intervalos $\mu_{c'} - 2\sigma_{c'} \leq c' \leq \mu_{c'} + 2\sigma_{c'}$ e $\mu_{\phi'} - 2\sigma_{\phi'} \leq \phi' \leq \mu_{\phi'} + 2\sigma_{\phi'}$. Para cada uma das combinações de c' e ϕ' é calculado o fator de segurança ao colapso. Com os 25 fatores de segurança é gerada a superfície de resposta, estabelecendo a superfície de resposta como função de falha é calculado os índices de confiabilidade os métodos de Monte Carlo e FORM (“*first order reliability method*”).

O procedimento descrito acima é repetido para cada um dos cenários de precipitações.

A figura 6.10a apresenta o gráfico dos pontos de fatores de segurança estimados que são necessários para a geração da superfície de resposta 6.10b ilustra o gráfico da superfície de resposta gerada.

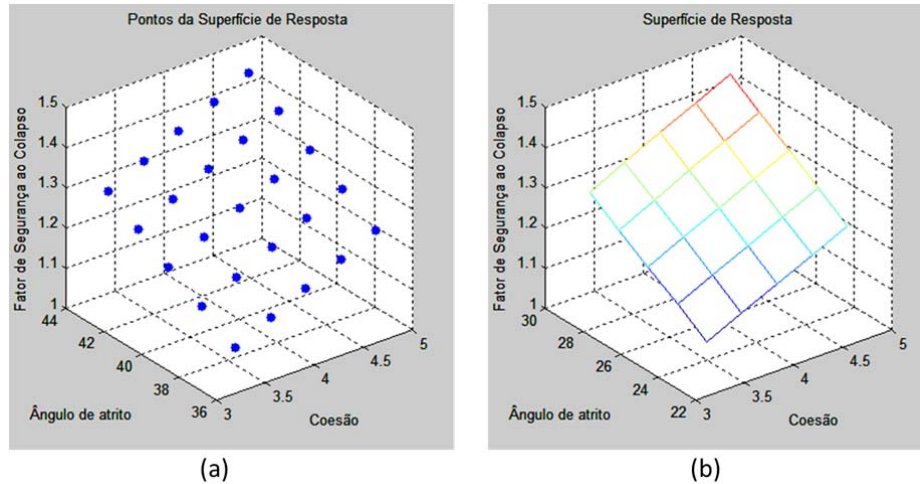


Figura 6.10 – (a) Pontos da superfície de resposta, (b) superfície de resposta aproximada; para as variáveis aleatórias c' e ϕ' .

As tabelas a seguir apresentam os resultados da análise de confiabilidade via superfície de resposta para os três cenários de precipitações analisados na encosta Coos Bay.

Tabela-6.6 - Resultado da análise de confiabilidade do caso 1.

Método	Tempo	Índice de Confiabilidade (β)
Monte Carlo	24 h	2,43
Monte Carlo	25,7 h	2,21
FORM	24 h	2,50
FORM	25,7 h	2,22

Tabela-6.7 - Resultado da análise de confiabilidade do caso 2.

Método	Tempo	Índice de Confiabilidade (β)
Monte Carlo	13,6 h	2,05
Monte Carlo	16,1 h	0,00
FORM	13,6 h	2,11
FORM	16,1 h	0,00

Tabela-6.8 - Resultado da análise de confiabilidade do caso 3.

Método	Tempo	Índice de Confiabilidade (β)
Monte Carlo	2,5 h	2.03
FORM	2,5 h	1,99

6.2.

Encosta da Vista Chinesa

Posicionado entre o mar e as montanhas, a cidade do Rio de Janeiro tem sofrido no seu passado, uma série deslizamentos e escorregamentos, nos períodos mais intensos de chuvas, em especial no período de chuva de verão. Um dos incidentes mais significativos ocorreu nos anos de maior índice pluviométrico, no mês de fevereiro do ano de 1988. O escorregamento da Vista Chinesa.

A Vista Chinesa situa-se dentro do atual Parque Nacional da Tijuca, na vertente marítima da Serra da Carioca, que juntamente com a Serra da Tijuca, compõem o maciço da Tijuca, localizado a sudoeste do município do Rio de Janeiro. A geologia local é formada basicamente por biotita-gnaiss, gnaiss facoidal, quartzitos. As camadas superficiais são formadas predominantemente por depósitos de solos coluvionais e residuais.

A figura 6.11 apresenta a geometria da encosta da vista Chinesa. A região em verde corresponde ao solo colúvio, a amarela corresponde ao solo residual e a cinza corresponde à rocha.

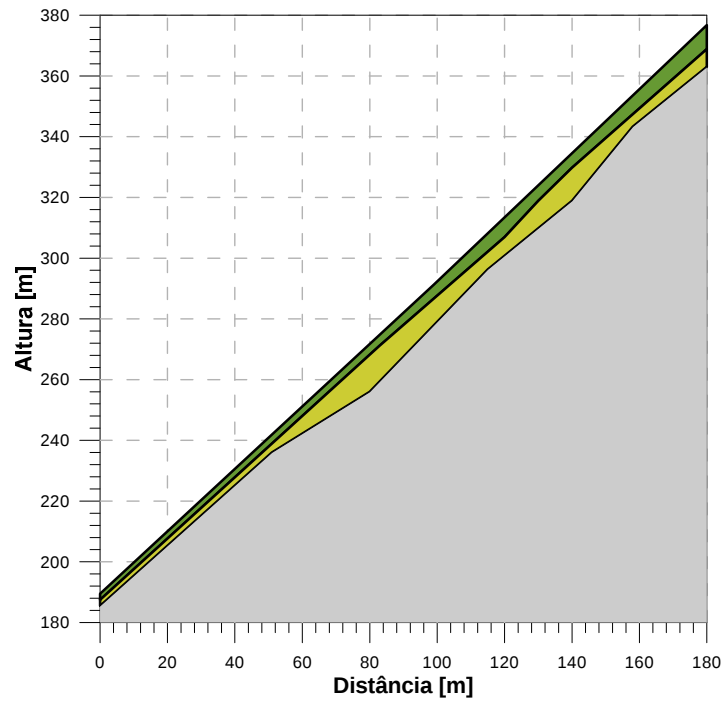


Figura 6.11 – Perfil geotécnico e geométrico da encosta da vista Chinesa.

A malha de elementos finitos utilizada é apresentada na figura 6.12. Foram gerados 5060 elementos e 5334 nós.

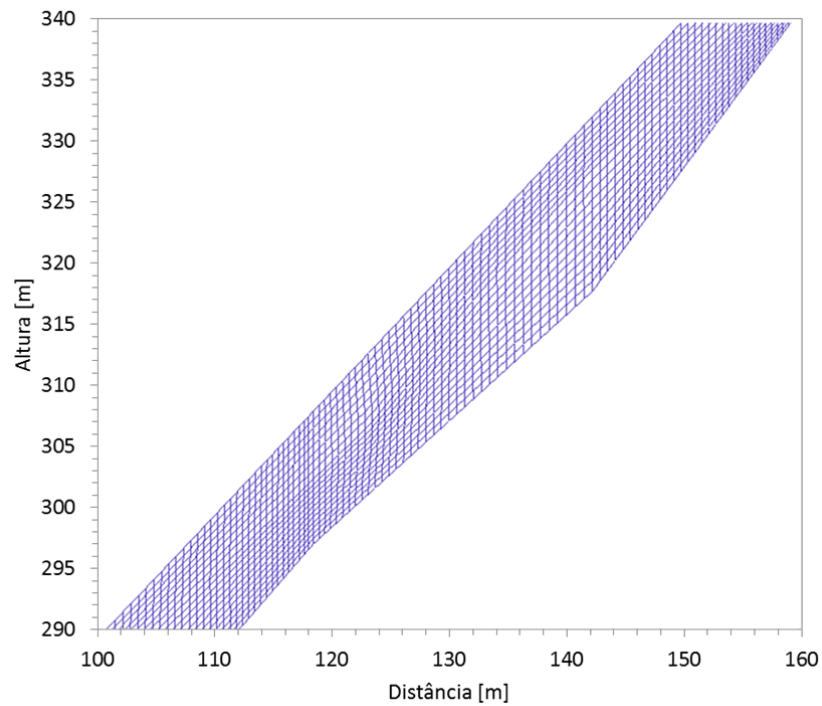


Figura 6.12 – Seção da malha de elementos finitos da encosta da vista Chinesa.

Do ponto de vista climático, a área se caracteriza como sendo de clima tropical quente e úmido, com elevada pluviosidade. O semestre mais chuvoso, representado pelos meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril, concentram cerca de 70% a 80% da pluviometria anual. No verão de 1988 entre os dias 18 e 22 do mês de fevereiro ocorreram inúmeros escorregamentos na Floresta da Tijuca devido as fortes chuvas que castigaram a Cidade de Rio de Janeiro (Soares, 1999).

A figura 6.13 apresenta o comportamento diário acumulado das chuvas em fevereiro de 1988. No período ocorreram alturas pluviométricas diárias superiores a 60 mm nos dias 3 5 12 19 20 21 e 22, chegando-se a registrar no dia 20 de fevereiro um valor de 178 mm de chuvas.

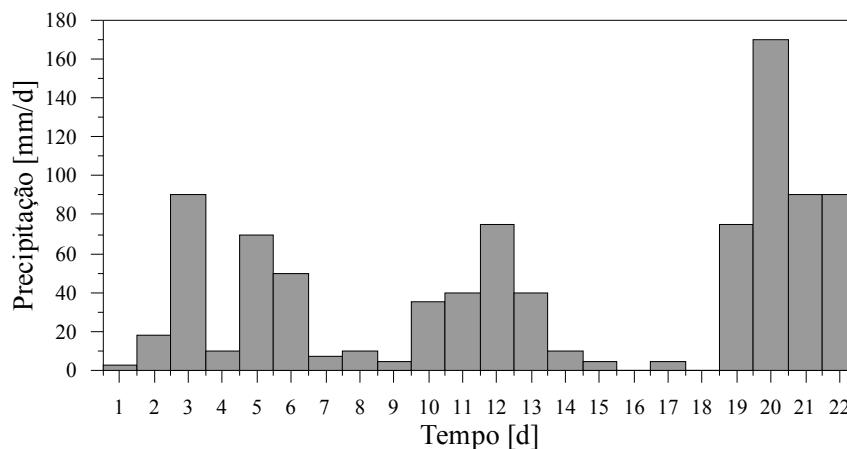


Figura 6.13 – Histograma da precipitação acontecida na encosta da vista Chinesa em 1988 (Adaptado de Velloso, 2007).

Para estabelecer os parâmetros necessários para a determinação da curva característica foram utilizadas as relações sucção-umidade obtidas por Delgado (1993). Estas relações foram obtidas com o equipamento de placa de pressão desenvolvido na PUC-Rio, os materiais colúvio amarelo e colúvio vermelho foram considerados de colúvio e os solos residual vermelho e residual amarelo, considerados apenas de um único solo residual.

Tabela 6.9 - Propriedades hidráulicas dos solos da vista Chinesa (Velloso, 2007).

Materiais	θ_r [-]	θ_s [-]	α [m⁻¹]	n [-]
Colúvio	0,20	0,53	7,00	1,68
Residual	0,10	0,49	3,50	1,40

Rocha (1993) determinou a condutividade hidráulica saturada dos materiais em laboratório, a partir de amostras cilíndricas e indeformadas, e em ensaios "in situ".

Os valores de condutividade hidráulica saturada utilizados nas análises de fluxo foram:

colúvio: $k_s = 1.0 \times 10^{-3}$ cm/s

residual: $k_s = 4.4 \times 10^{-3}$ cm/s

As curvas características utilizadas são apresentadas nas figuras a seguir:

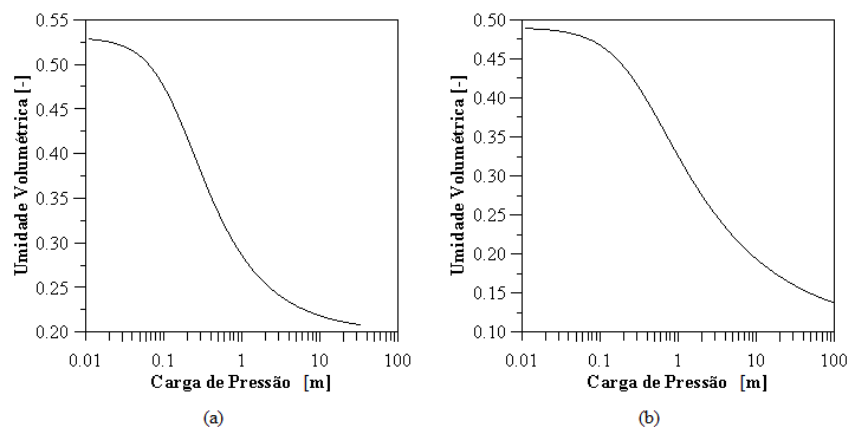


Figura 6.14 – Curvas características (a) solo coluvionar e (b) solo residual

(Adaptado de Velloso, 2007).

A encosta é submetida à chuva durante 22 dias. As precipitações estão indicadas na figura 6.13. A condição de contorno na borda superior é de fluxo prescrito, ou seja, a precipitação.. No contato solo-rocha a condição de contorno é considerada como impermeável. No talude é considerado uma sucção inicial, de 48 kPa no colúvio e uma sucção de 60 kPa no solo residual.

Os resultados da análise de fluxo saturado e não saturado são apresentados a seguir:

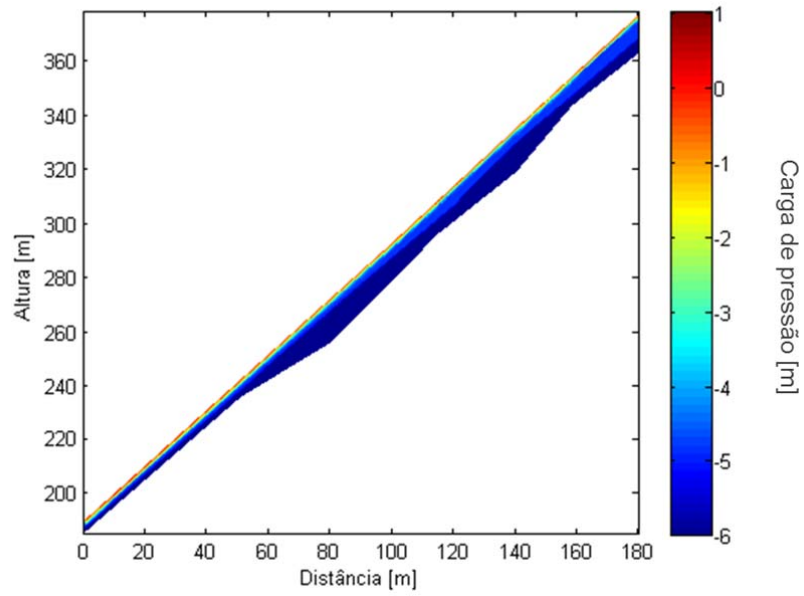


Figura 6.15 – Variação da carga de pressão no dia 3 de precipitação.

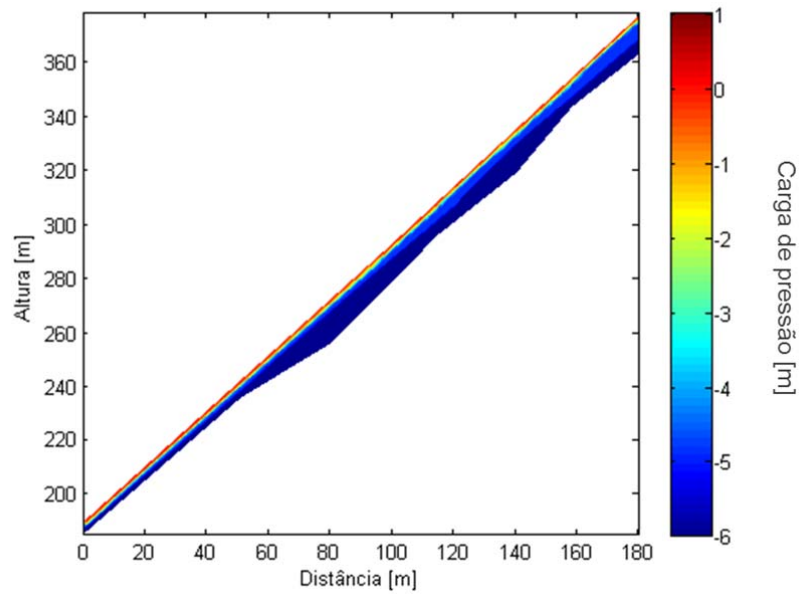


Figura 6.16 – Variação da carga de pressão no dia 5 de precipitação.

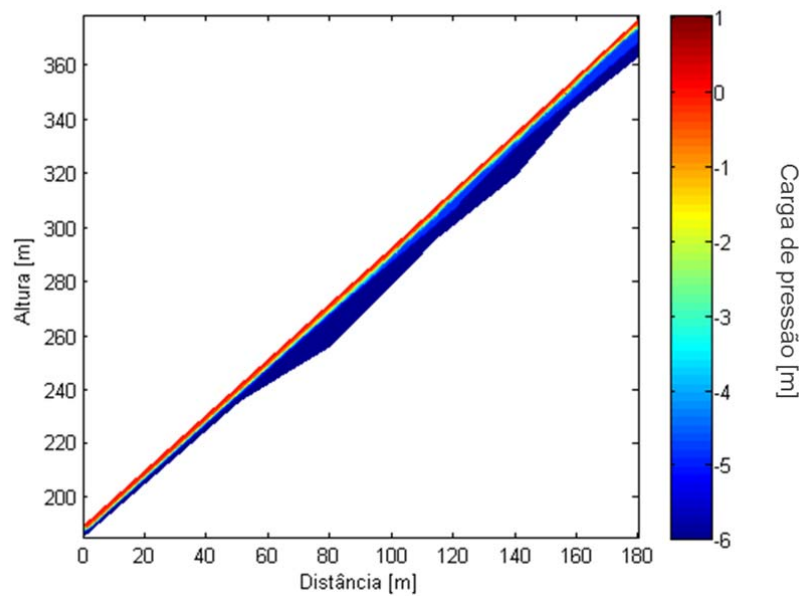


Figura 6.17 – Variação da carga de pressão no dia 12 de precipitação.

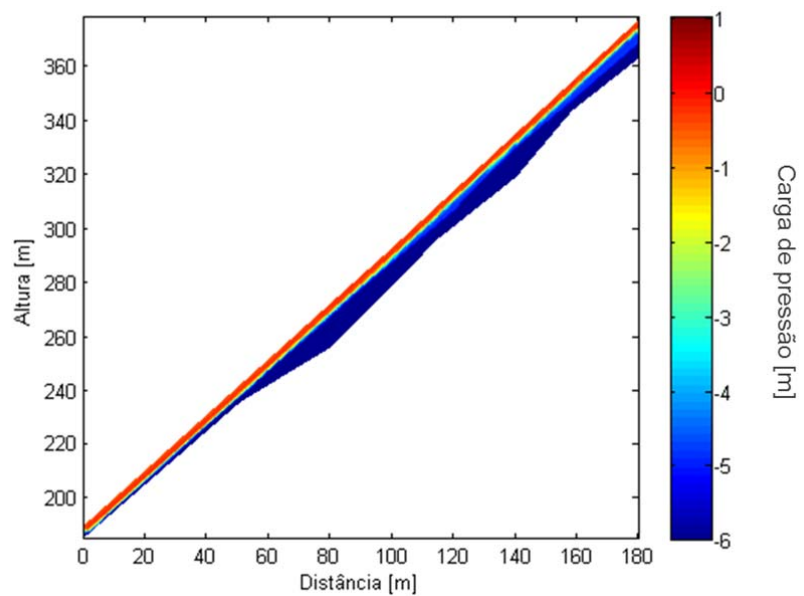


Figura 6.18 – Variação da carga de pressão no dia 18 de precipitação.

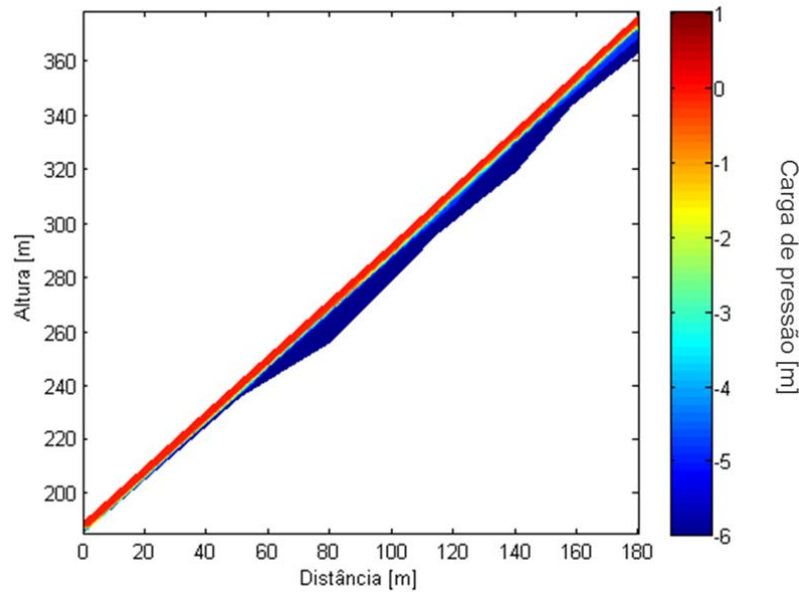


Figura 6.19 – Variação da carga de pressão no dia 22 de precipitação.

Delgado (1993) determinou os parâmetros de resistência para solos saturados e não saturados, todos os ensaios foram realizados sobre amostras submersas, os resultados destes ensaios estão apresentados na tabela a seguir:

Tabela 6.10 - Propriedades de resistência da encosta da Vista Chinesa.

Materiais	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [°]
Coluvio	5,50	26
Residual	11,00	29

Velloso (2007) considerou como sendo 26 graus o ângulo ϕ_b para o coluvio, pois o intervalo de sucção nas análises é de 0 a 50 kPa. Para o solo residual o ângulo adotado é 29 graus.

Como no exemplo 6.1 a condição de resistência da análise limite é o critério de resistência em solos não saturados formulado por Fredlund et al. (1978) (equação 2.11). Também é utilizada a técnica de redução de progressiva (ver o item 4.8.1) para os parâmetros de resistência c' e ϕ' .

Os resultados da variação do fator de segurança ao colapso (FS) determinado utilizando análise limite no espaço cônico quadrático, durante os 22 dias de precipitação é apresentado na figura 6.20.

Velloso (2007) realizou a mesma análise utilizando o programa numérico SLOPE-W, na figura (6.20) são incluídos os fatores de segurança obtidos por Velloso (2007) que utiliza o método de equilíbrio limite.

As diferenças observadas entre os resultados de Velloso (2007) e os fatores de segurança ao colapso (FS) obtidos utilizando a análise limite entre os dias 8, 9, 10, 11 e 12; podem ser devido a comparação entre dois métodos diferentes (Equilíbrio Limite e Análise Limite). Vale lembrar também que o resultado de Velloso (2007) corresponde a uma superfície de ruptura geometricamente limitada; já o resultado da análise limite considera a geometria total da encosta.

Outros aspectos a serem considerados são as malhas de elementos finitos utilizadas na análise de fluxo, pois a malha de elementos finitos da análise de fluxo de Velloso (2007) é inferior em número comparada com a utilizada no presente trabalho. Também se devem verificar alguns parâmetros da análise de fluxo, sobretudo os parâmetros empíricos da curva característica do modelo de Van Genuchten (α e n). Finalmente outro parâmetro a ser revisado deve ser o grau de saturação dos solos, pois este limita a presença do solo saturado no modelo.

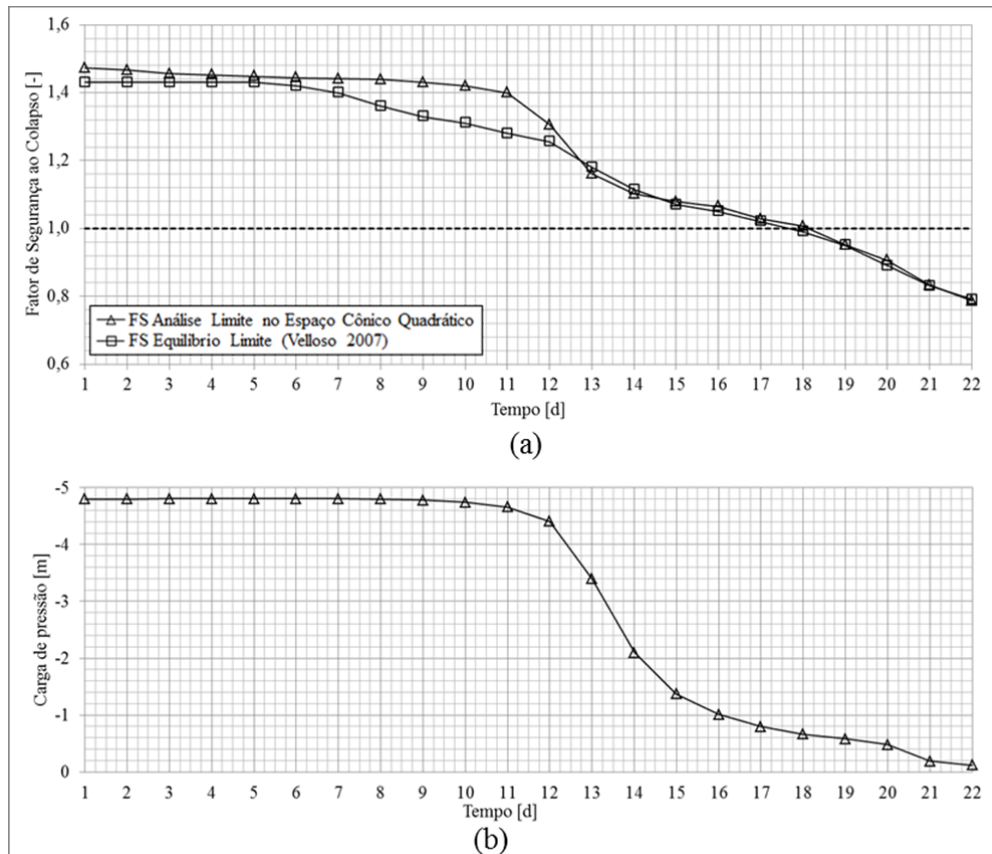


Figura 6.20 – (a) Resultados do fator de segurança ao colapso (FS) da encosta da Vista Chinesa e (b) variação da carga de pressão no tempo.

A seguir é realizada a análise de confiabilidade da encosta da Vista Chinesa. As variáveis consideradas como aleatórias são a coesão no solo coluvionar (c'_1) e a coesão no solo residual (c'_2). Isto porque na metodologia apresentada são consideradas somente duas variáveis aleatórias. Como pode ser observado no item 5.5.1 o parâmetro de maior importância dentre todos os parâmetros de resistência é a coesão. As propriedades estatísticas das variáveis aleatórias são apresentadas na tabela 6.11.

Tabela 6.11 - Propriedades das variáveis aleatórias da encosta da Vista Chinesa.

Variável	Média (μ_{x_i})	Desvio padrão (σ_{x_i})
c'_1 coluvio	5,5 kPa	15%
c'_2 residual	11,0 kPa	10%

As funções de falha necessárias para a utilização dos métodos de Monte Carlo e FORM são geradas mediante a técnica de superfície de resposta.

As funções de falha para as variáveis aleatórias c'_1 e c'_2 têm a forma: $g(c'_1, c'_2) = \theta(c'_1, c'_2) - 1 \leq 0$.

Foram geradas superfícies de resposta para cada um dos 22 dias de infiltração de chuva, cada uma das superfícies de resposta possui 25 pontos que correspondem a fatores de segurança ao colapso (FS). Cada um dos 25 fatores de segurança ao colapso (FS) corresponde ao resultado da análise limite para uma combinação das variáveis aleatórias c'_1 e c'_2 . Os intervalos de c'_1 e c'_2 considerados são: $\mu_{c'_1} - 1.5\sigma_{c'_1} \leq c'_1 \leq \mu_{c'_1} + 1.5\sigma_{c'_1}$ e $\mu_{c'_2} - 1.5\sigma_{c'_2} \leq c'_2 \leq \mu_{c'_2} + 1.5\sigma_{c'_2}$.

A figura 6.21 mostra os 25 pontos estimados para a geração da superfície em função de c'_1 e c'_2 e o gráfico da superfície de resposta gerada. A superfície de resposta apresentada corresponde ao dia de simulação 18.

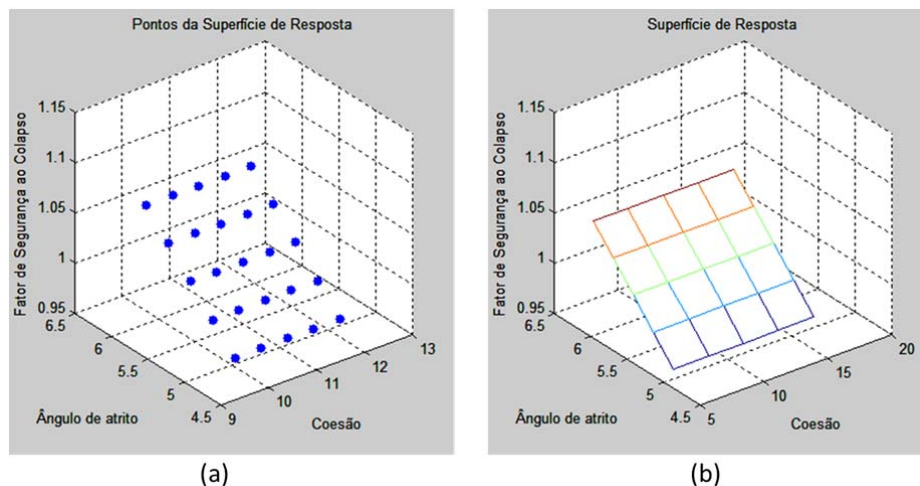


Figura 6.21- (a) Pontos da superfície de resposta, (b) superfície de resposta aproximada; para as variáveis aleatórias c'_1 e c'_2 .

Cada uma das superfícies de resposta são avaliadas utilizando métodos de Monte Carlo e FORM (“*first order reliability method*”) para estabelecer os índices de confiabilidade.

A figura a 6.23 apresenta os resultados da análise de confiabilidade via superfície de resposta da encosta da Vista Chinesa, quando utilizados os métodos de Monte Carlo e FORM.

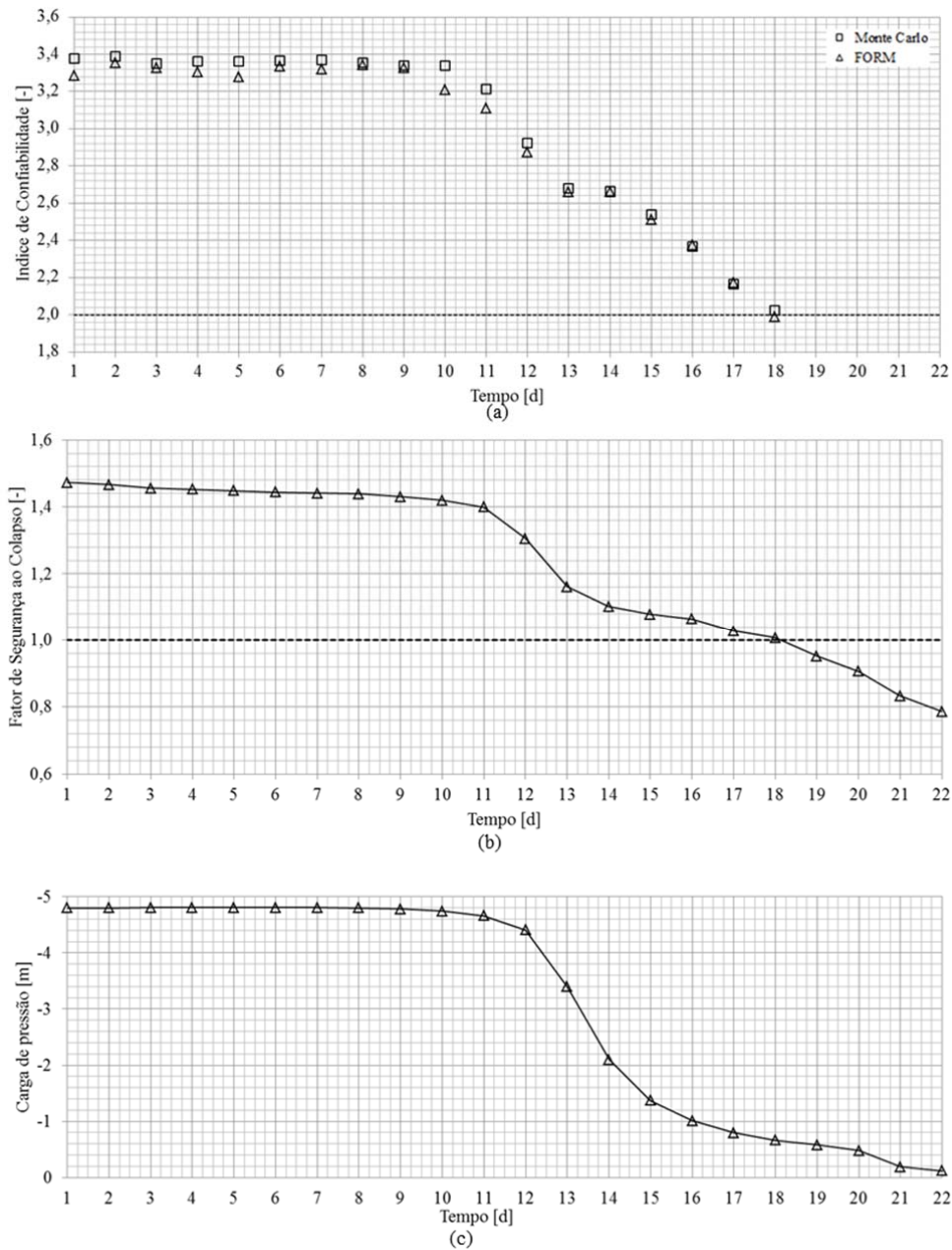


Figura 6.22 – (a) Resultados do β da encosta da Vista Chinesa comparado com os (b) Fatores de segurança ao colapso (FS) via análise limite e (c) variação da carga de pressão no tempo.

Para os dias 19, 20, 21 e 22 os valores do índice de confiabilidade foram muito menores que dois e próximos à zero. Pressupõe-se, que isso aconteça porque os valores de FS nestes dias são menores que 1. Produzindo superfícies de resposta

$\theta(c'_1, c'_2)$ com pontos menores que um dificultando a utilização da função de falha $g(c'_1, c'_2) = \theta(c'_1, c'_2) - 1 \leq 0$.