

# Altura Crítica de Aterros sobre Solos Moles: Métodos Empíricos e Equilíbrio Limite

Dêreck Hummel Becher

Mestrando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, [dereckhbecher@gmail.com](mailto:dereckhbecher@gmail.com)

Jose Leonardo dos Santos

Graduando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, [js6400@hotmail.com](mailto:js6400@hotmail.com)

Leonardo Alberto do Nascimento

Doutorando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, [leo\\_ladn@yahoo.com.br](mailto:leo_ladn@yahoo.com.br)

Magnos Baroni

Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, [magnos.baroni@ufsm.br](mailto:magnos.baroni@ufsm.br)

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo avaliar a altura crítica de aterros construídos sobre solos moles, com base em métodos empíricos e modelagem numérica. A altura crítica, para a estabilidade de taludes, representa o limite máximo de um aterro que pode ser executado sobre um solo de baixa resistência sem que ocorra ruptura. A análise foi conduzida em um cenário hipotético composto por um talude arenoso assentado sobre uma camada de argila mole com espessura finita. Foram aplicados métodos empíricos, como a equação de capacidade de carga de Terzaghi (1943), os ábacos desenvolvidos por Souza Pinto (1966) e o método de Fellenius, considerando diferentes condições de resistência ao cisalhamento não drenada e diferentes alturas de aterro. Os resultados obtidos foram comparados com análises de estabilidade realizadas por meio do método de equilíbrio limite. Os resultados mostraram boa concordância entre os métodos empíricos e numéricos, com destaque para a consistência dos valores de fator de capacidade de carga adotados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aterros sobre solos moles, Altura crítica, Métodos empíricos, Método equilíbrio limite.

**ABSTRACT:** This study aims to evaluate the critical height of embankments constructed over soft soils, based on empirical methods and numerical modeling. The critical height represents the maximum embankment height that can be built on a low-strength soil without causing failure or excessive settlements. The analysis was conducted in a hypothetical scenario consisting of a sandy embankment placed over a finite-thickness layer of soft clay. Empirical methods were applied, such as Terzaghi's (1943) bearing capacity equation, the charts developed by Souza Pinto (1966), and the method proposed by Fellenius, considering different undrained shear strength conditions and varying embankment heights. The results were compared with stability analyses performed using the limit equilibrium method. The outcomes showed good agreement between the empirical and numerical approaches, particularly highlighting the consistency of the adopted bearing capacity factor values.

**KEYWORDS:** Embankments on soft soils, Critical height, Empirical methods, Limit equilibrium method.

## 1 INTRODUÇÃO

A ocupação de áreas costeiras no Brasil é historicamente intensa, com grande concentração urbana e significativa implantação de infraestrutura em regiões onde predominam solos moles - materiais sedimentares caracterizados por elevada compressibilidade, baixa resistência ao cisalhamento e alto grau de saturação (Massad, 2009). Regiões com solos mais competentes, que apresentam boa capacidade de suporte, estão se tornando cada vez mais escassas, especialmente em áreas de grande densidade populacional (Almeida & Marques, 2014, Baroni, 2016). Os solos de baixa resistência, amplamente distribuídos ao longo do litoral brasileiro, impõem desafios substanciais à engenharia geotécnica, particularmente na construção de rodovias,

ferrovias, portos e demais obras de infraestrutura. O avanço tecnológico, aliado ao crescimento populacional, exige estruturas cada vez mais robustas e desafiadoras, muitas vezes implantadas sobre camadas espessas de solo mole, intensificando riscos de instabilidade e recalques excessivos, exigindo soluções de engenharia cada vez mais eficazes (Palmeira, 2002).

Neste contexto, o presente estudo concentra-se na análise do comportamento de aterros construídos sobre uma camada de argila mole, com ênfase na avaliação da chamada altura crítica. A investigação parte de um cenário hipotético composto por um talude arenoso apoiado sobre uma camada de solo mole com espessura finita. Para a estimativa da altura crítica, foram adotados métodos empíricos discutidos na literatura, como as equações de capacidade de carga de Terzaghi (1943) e os ábacos propostos por Souza Pinto (1966). Essas metodologias foram aplicadas ao cenário proposto, juntamente com análises numéricas com o método de equilíbrio limite. A comparação entre as diferentes abordagens tem como objetivo discutir a precisão, as limitações e a aplicabilidade de cada método, mesmo que de forma preliminar, no dimensionamento de aterros sobre solos moles.

## 2 ATERROS SOBRE SOLOS MOLES

Conforme Almeida & Marques (2014), a escolha do método construtivo mais adequado para a execução de aterros sobre solos moles depende de diversos fatores, como as características geotécnicas dos depósitos, a destinação da área (incluindo seu entorno), prazos de execução, custos envolvidos, entre outros aspectos. Ainda segundo os autores, independentemente da metodologia adotada — seja com ou sem o uso de técnicas de reforço do solo, é fundamental garantir a estabilidade da obra frente a três principais modos distintos de instabilidade: interna, externa e global.

A instabilidade interna refere-se à ruptura do próprio corpo do aterro, sem envolvimento da camada de solo mole, geralmente por deslizamento lateral do maciço. A instabilidade da fundação está associada à ruptura da camada argilosa, configurando um problema típico de capacidade de carga. Por fim, a instabilidade global corresponde à ruptura do conjunto aterro-fundação como um sistema único (Figura 1).

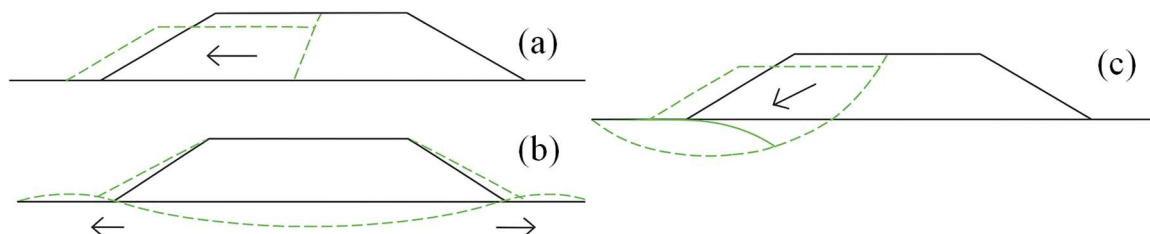


Figura 1. Modos de ruptura de aterro sem reforço: (a) instabilidade interna; (b) instabilidade da fundação e (c) instabilidade global. Adaptado de Jewell (1982) apud Almeida & Marques (2014).

Embora todos os modos de ruptura devam ser avaliados, os que geralmente governam a estabilidade de aterros sobre solos moles são a ruptura da fundação e a instabilidade global (Almeida & Marques, 2014). Nessas análises, é comum adotar o comportamento não drenado da argila mole, com base em tensões totais, devido à simplicidade e à praticidade dessa abordagem. As análises em termos de tensões efetivas, embora mais rigorosas, requerem a estimativa precisa das poropressões desenvolvidas na camada de solo mole, o que aumenta significativamente a complexidade do processo.

A ruptura da fundação do aterro caracteriza-se como um problema de capacidade de carga, diretamente influenciado pela altura do aterro e pela resistência da argila mole. Nessa situação, o aterro atua apenas como carregamento, sem contribuir com sua própria resistência, sendo comumente representado como uma sapata rígida apoiada sobre a fundação deformável (Almeida & Marques, 2014).

A resistência não drenada do solo de fundação ( $S_u$ ) é o parâmetro geotécnico mais crítico em análises de estabilidade. Pequenas variações no seu valor podem comprometer significativamente a segurança da obra. Nas argilas moles, essa resistência é fortemente influenciada por diversos fatores, e sua variabilidade pode ultrapassar 30% (Pinto, 1994), o que reforça a necessidade de uma investigação geotécnica criteriosa e representativa.

### 3 ESTIMATIVA ALTURA CRÍTICA

A altura crítica ( $h_{cr}$ ) corresponde à altura máxima de um aterro que pode ser construída sobre um solo mole sem que ocorra ruptura por instabilidade ou recalques excessivos. Quando essa altura é ultrapassada, a fundação não é capaz de suportar a carga adicional imposta pelo aterro, resultando na ruptura do material. A estimativa da  $h_{cr}$  está diretamente relacionada ao  $S_u$  da argila mole. Diferentes métodos na literatura permitem a obtenção desse valor, com base em formulações teóricas e empíricas que consideram as propriedades do solo, geometria do maciço e as condições de carregamento, por exemplo.

#### 2.1 Método de Terzaghi (1943) – Capacidade de Carga Fundação

A equação utilizada para a estimativa da  $h_{cr}$  deriva da equação clássica de capacidade de carga de uma fundação direta proposta por Terzaghi (1943). Ele desenvolveu uma teoria de capacidade de carga em um sistema sapata-solo:

$$\sigma_r = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_\gamma \quad (1)$$

As três parcelas representam respectivamente, as contribuições de coesão, sobrecarga e peso específico do solo. Os fatores de capacidade de carga  $N_c$ ,  $N_q$  e  $N_\gamma$  são adimensionais e dependem unicamente do ângulo de atrito interno do solo. No caso de argilas saturadas na condição não drenada ( $\phi=0$ ), a equação se reduz apenas para a parcela referente a coesão, sendo válida para solos homogêneos:

$$\sigma_r = cN_c \quad (2)$$

Sendo  $N_c$  o fator de capacidade de carga do solo de fundação. Num aterro sobre solos moles, a carga que leva a ruptura é o próprio peso do aterro. A equação para a  $h_{cr}$  se reduz em uma expressão simples:

$$h_{cr} = \frac{N_c * S_u}{\gamma_{at}} \quad (3)$$

Sendo  $\gamma_{at}$  o peso específico do aterro. Há várias formas de estimar o valor de  $N_c$ . Terzaghi & Peck (1967) e Vésic (1975) apresentam valores para o coeficiente (Cintra et al, 2011). Para solos com  $\phi = 0$ , os autores sugerem  $N_c = 5,14$ . A altura admissível  $h_{adm}$  adotada em projeto, com um fator de segurança  $F_s$ , para um aterro construído em uma etapa é:

$$h_{adm} = \frac{h_{cr}}{F_s} = \frac{N_c * S_u}{\gamma_{at} * F_s} \quad (4)$$

De modo geral, utilizam-se valores de  $F_s$  superiores a 1,5. No entanto, valores de  $F_s \geq 1,3$  podem ser aceitos em situações de caráter temporário, especialmente quando há monitoramento contínuo por instrumentação geotécnica e ausência potenciais riscos nas imediações (Almeida & Marques, 2014).

Segundo Duncan & Poulos (1977), apesar das limitações teóricas envolvidas, a simplicidade dessa relação a torna prática e amplamente reconhecida, principalmente em estudos preliminares e em condições de campo, sendo sua acurácia significativamente aprimorada quando combinada com dados empíricos e experiências anteriores.

#### 2.2 Método de Fellenius

Fellenius foi um dos primeiros a apresentar soluções para a estabilidade de aterros sobre solos moles. O autor considerou o caso de uma carga distribuída uniformemente sobre a superfície de uma camada argilosa

com coesão constante e espessura significativa ( $D$ ). Admitindo superfícies de ruptura circulares, igualou os momentos atuantes e os momentos resistentes, resultando numa formulação simples, uma vez que a resistência ao cisalhamento era considerada puramente coesiva. Fellenius concluiu que o centro do círculo crítico se localiza sobre a vertical que passa pela borda da área carregada, formando um ângulo central de  $133,5^\circ$  ( $2\alpha$ ) (Massad, 2010).

O método de Fellenius considera, também, que a resistência ao cisalhamento se iguala à coesão não drenada,  $\tau_{\text{máx}} = S_u$  e a carga que leva a ruptura, para carregamento uniformemente distribuídos é:

$$q_r = 5,5 \cdot c \quad (5)$$

$$h_{cr} = \frac{5,5 \cdot c}{\gamma_{at}} \quad (6)$$

Onde  $c$  tem o mesmo valor de  $S_u$ . Para espessuras de solo mole tais que:

$$D < \frac{b}{0,758} \quad (7)$$

O círculo associado ao coeficiente de segurança mínimo não pode se desenvolver plenamente, o que torna possível lançar aterros com alturas maiores que o descrito na equação de altura crítica. Ortigão (1980) e Coutinho (1986) utilizaram esta formulação em retroanálise para estimar valores de  $S_u$  de campo. Os valores obtidos apresentaram boa concordância com os resultados provenientes dos ensaios de palheta realizados in situ, o que reforça a utilidade prática da equação mesmo em análises retrospectivas.

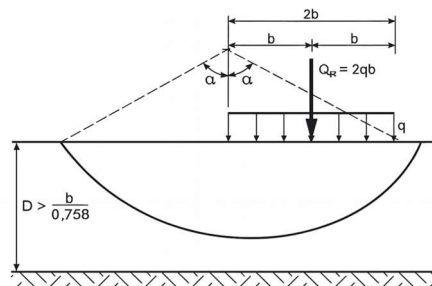


Figura 2. Solução de Fellenius para carregamentos uniformes (Massad, 2010).

### 2.3 Ábacos de Souza Pinto (1966)

Souza Pinto (1966) estudou depósitos em que a coesão cresce linearmente com a profundidade (Equação 8), condição comum para argilas moles. Nesse sentido, os círculos críticos tendem a ser mais superficiais, se concentrando nas regiões onde o solo oferece menor resistência.

$$S_u = c_0 + c_1 \cdot z \quad (8)$$

Sendo  $c_0$  a coesão na superfície do terreno e  $c_1$  a taxa de crescimento da coesão no decorrer da profundidade  $z$ . Os fatores de capacidade de cargas são apresentados na forma de ábacos (Figura 3). Nestes, o autor não considera a resistência do aterro, entretanto sua aplicação pode ser muito útil para aterros baixos, nas quais a resistência do aterro tem uma parcela significativamente pequena em comparação a parcela da massa de argila. A geometria considerada envolve aterros com altura  $H$  e projeção horizontal do talude  $d$ . Para taludes mais íngremes, a altura crítica tende a atingir seus menores valores (Massad, 2010).

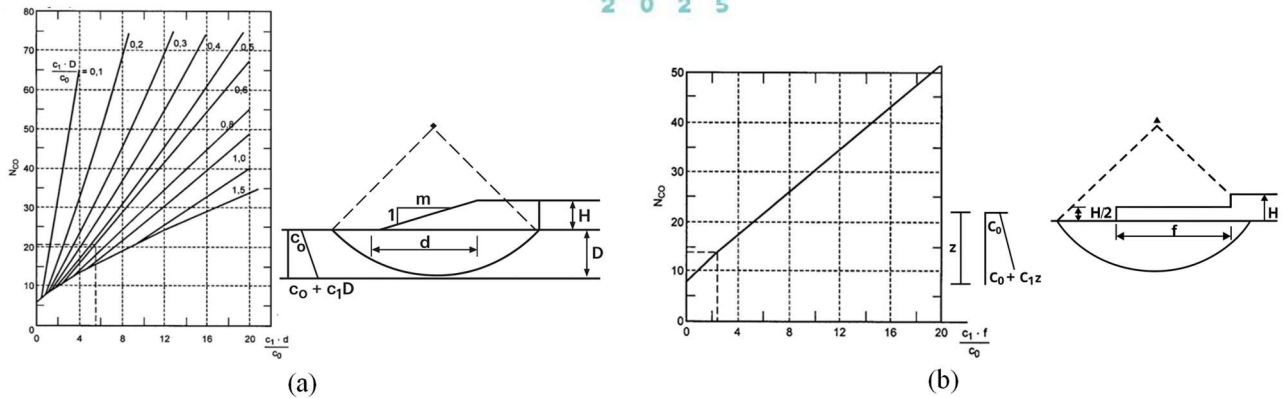


Figura 3. Ábacos de Souza Pinto (1966) para aterros sobre solos moles: (a) talude funcionando como berma; (b) berma com a metade da altura do aterro (Massad, 2010).

Como o uso de modelagens computacionais para análises de estabilidade é amplamente implementado, existe disponibilidade de expressões matemáticas para o cálculo dos fatores de capacidade de carga  $N_c$ :

Para camadas de solos moles muito espessas ( $D = \infty$ ):

$$N_c = 6,1 + 2,1 \cdot \frac{c_1 d}{c_0} \quad \text{para } 0 \leq \frac{c_1 d}{c_0} \leq 2 \quad (9)$$

$$N_c \cong 7,0 + 1,4 \cdot \frac{c_1 d}{c_0} \quad \text{para } 2 \leq \frac{c_1 d}{c_0} \leq 20 \quad (10)$$

Para casos em que  $D$  é finito:

$$DN_c \cong \max \left[ \left( 1,0 + \frac{c_1 d}{c_0} + 1,5 \cdot \frac{d}{D} \right); N_c (D = \infty) \right] \quad (11)$$

### 3 MODELAGEM NUMÉRICA

As análises numéricas de estabilidade foram realizadas no software Slide v.6.025, pelo Método de Equilíbrio Limite (MEL), licenciado pela Universidade Federal de Santa Maria. O aterro proposto possui inclinação de 1:2 (V:H), com  $\phi = 30^\circ$ , e alturas variando de 2,0 até 6,5 metros. A camada de argila mole possui espessura de 10 metros, com  $S_u$  constante com a profundidade, e está assentada sobre uma camada impenetrável. Foram avaliados diferentes valores de  $S_u$ . O método de cálculo usado foi de Morgenstern-Price (1965), o qual possui uma consideração precisa e rigor, satisfazendo todas as equações de equilíbrio estático do sistema (Gerscovich, 2016). O mesmo perfil geotécnico foi utilizado para as análises realizadas pelos demais métodos supracitados.

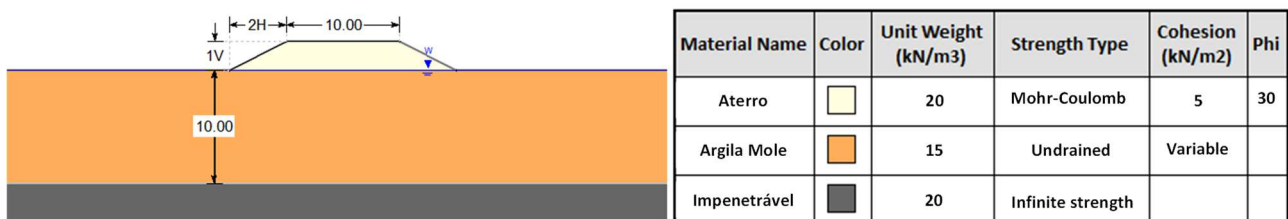


Figura 4. Seção de aterro proposta em conjunto com parâmetros utilizados.



## 4 RESULTADOS

Inicialmente, foi realizada uma análise de sensibilidade no software Slide, com o objetivo de identificar os valores de  $S_u$  da camada de argila mole que satisfizessem os FS estabelecidos para diferentes alturas de aterro. Durante essa etapa, manteve-se constante tanto a inclinação do talude quanto o ângulo de atrito interno do aterro. A Figura 5 apresenta os valores de  $S_u$  obtidos para cada um dos cenários analisados. Observa-se uma relação linear entre a altura do aterro e a resistência não drenada necessária para garantir a estabilidade, independentemente do FS adotado. Esse comportamento corrobora a utilização de um fator de capacidade de carga NC constante e diretamente proporcional entre  $h_{cr}$  e  $S_u$

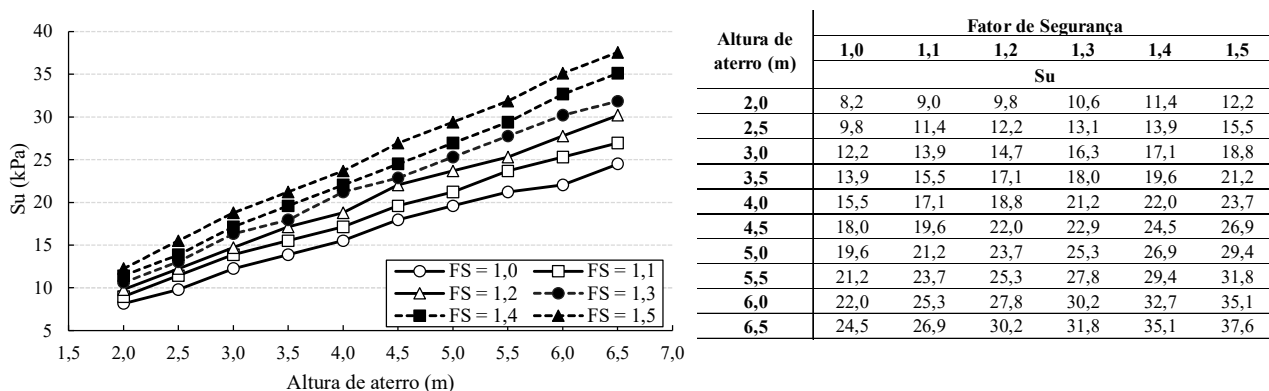


Figura 5. Resultados da análise de sensibilidade do  $S_u$  em diferentes cenários analisados.

A partir dos valores de  $S_u$  obtidos para a condição de altura crítica (isto é, quando  $FS=1,0$ ) por meio do MEL, procedeu-se à comparação com os resultados estimados pelos diferentes métodos empíricos. No caso do método proposto por Souza Pinto (1966), embora seja considerada um  $S_u$  linearmente crescente com a profundidade, no cenário criado foi adotado uma resistência não drenada, ou seja, com uma taxa de variação nula ( $c_l=0$ ). A Figura 6 apresenta a comparação dos resultados obtidos. Observa-se uma semelhança entre os resultados obtidos pela MEL e os resultados pela equação de Terzaghi (1943). A metodologia de Pinto (1966) foi a que mais se distanciou dos demais resultados, com alturas críticas de aterros superiores as demais. Ressalta-se que esta metodologia foi proposta para depósitos de argila mole com  $S_u$  linearmente crescente com a profundidade, diferentemente da situação proposta nesse trabalho.

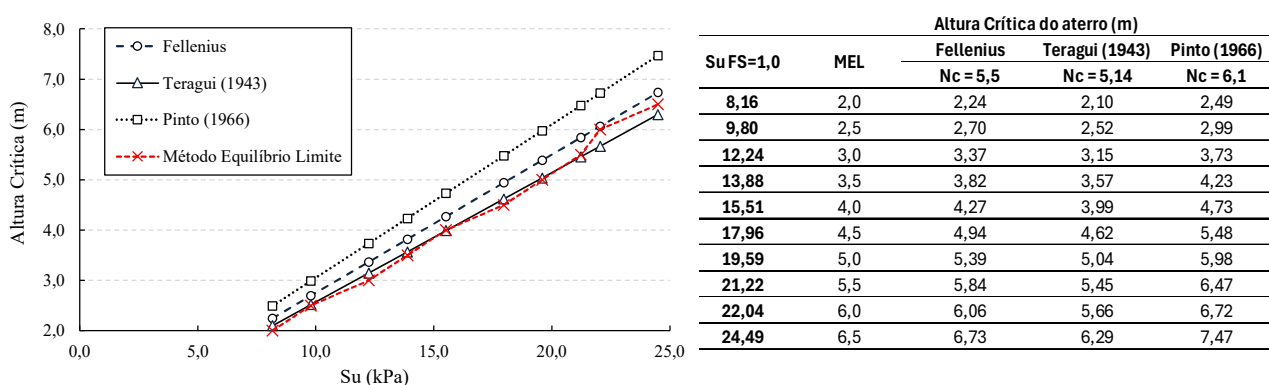


Figura 6. Comparação das alturas críticas para cada um dos métodos analisados.

A partir dos valores de  $S_u$  encontrados na análise de equilíbrio limite (apresentados na Figura 5) para cada uma das alturas de aterro e dos valores de  $F_s$ , buscou-se encontrar os respectivos valores de  $N_c$  para cada um dos cenários:

$$N_c = \frac{h_{at} * \gamma_{at}}{S_{u\ MEL}} \quad (12)$$

Os resultados são apresentados na Figura 7. Ademais, nessa figura são confrontados os valores de  $N_c$ ,  $F_s$ , e altura de aterro. A relação entre altura admissível e o fator  $N_c$  é diretamente proporcional pelas metodologias usadas, mas observa-se neles uma sutil alternância em relação a linha de tendência, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) variando entre 0,65 e 0,82.

Altura de aterro (m)	Fator de Segurança					
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
	$N_c$					
2,0	4,90	4,45	4,08	3,77	3,50	3,27
2,5	5,10	4,37	4,08	3,83	3,60	3,22
3,0	4,90	4,32	4,08	3,68	3,50	3,20
3,5	5,04	4,51	4,08	3,90	3,57	3,30
4,0	5,16	4,67	4,26	3,77	3,63	3,38
4,5	5,01	4,59	4,08	3,94	3,67	3,34
5,0	5,10	4,71	4,22	3,95	3,71	3,40
5,5	5,18	4,65	4,35	3,96	3,74	3,46
6,0	5,44	4,74	4,32	3,97	3,67	3,42
6,5	5,31	4,83	4,30	4,08	3,70	3,46
Média	5,12	4,59	4,19	3,88	3,63	3,34
Média x $F_s$	5,12	5,04	5,03	5,05	5,08	5,02

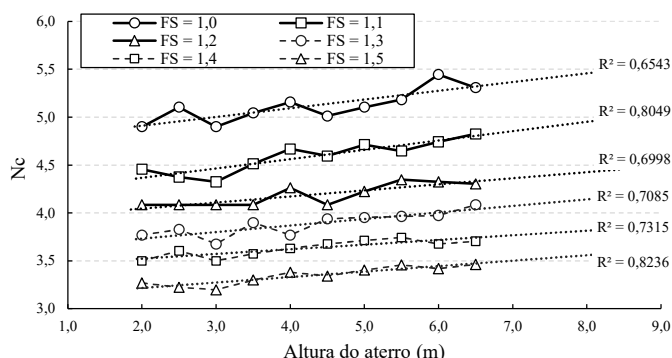


Figura 7. Valores encontrados para a capacidade de carga da fundação.

A análise de sensibilidade discutida anteriormente foi realizada sob um intervalo de  $S_u$  de 0 a 40 kPa, sendo usados 50 valores desse parâmetro igualmente espaçados. Para cada uma das 10 diferentes alturas de aterro, foram analisados os valores de  $F_s$  encontrados, que variaram entre 0,1 e 5. Com esses dados, buscou-se encontrar os respectivos valores de  $N_c$  a partir dos parâmetros de aterro,  $S_u$  e dos  $F_s$  obtidos (Equação 13).

$$N_c = \frac{h_{at} * \gamma_{at} * F_s}{S_{u\ MEI}} \quad (13)$$

Com a obtenção dos fatores de capacidade de carga para cada cenário criado (500 cenários ao todo foram analisados), plotou-se esses valores, em função do  $S_u$  e da altura do aterro. A Figura 8 apresenta esses resultados. Nota-se uma certa variação do  $N_c$  para valores de  $S_u$  inferiores a 4 kPa. Mas, para maiores valores de  $S_u$ , os fatores de capacidade de carga obtidos nesse modelo tenderam a se estabilizar. Avaliando os resultados de  $N_c$  para valores de  $S_u > 4,0$  kPa, tem-se um total de 450 resultados, resultando numa média de 5,199, com desvio padrão de 0,3201 e coeficiente de variação de 6,16%.

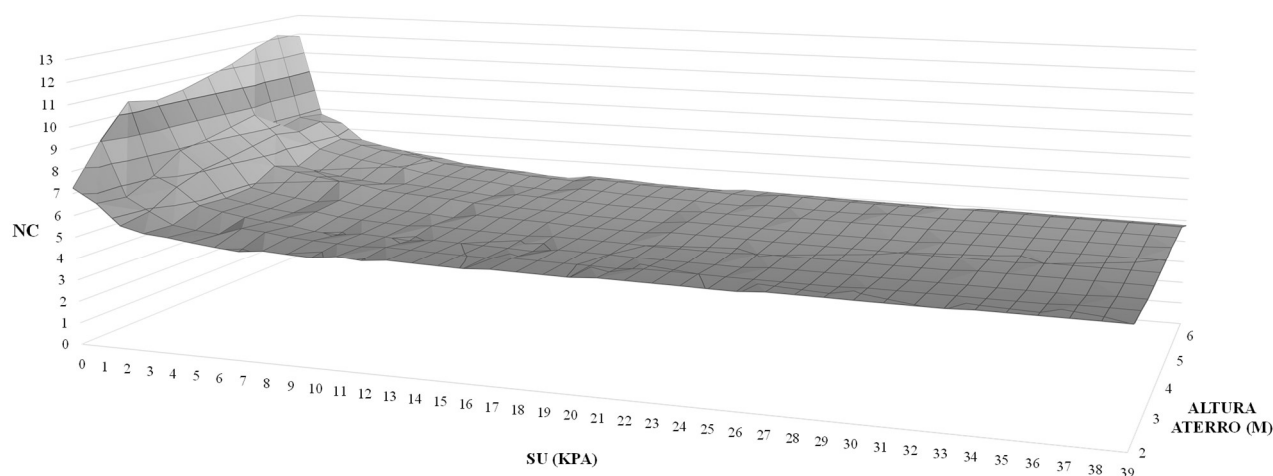


Figura 8. Relação entre  $N_c$ ,  $S_u$  e Altura de aterro, já considerando os respectivos valores de  $F_s$ .

## 5 CONCLUSÕES

A análise comparativa entre métodos empíricos e modelagem numérica demonstrou que abordagens clássicas, como as propostas por Terzaghi (1943) e Fellenius apresentam boa coerência com os resultados obtidos pelo método de equilíbrio limite. Essa compatibilidade evidencia o valor dessas metodologias em etapas preliminares de projeto, sobretudo em situações com dados geotécnicos limitados. A metodologia de Souza Pinto (1966), por outro lado, apresentou maiores discrepâncias, o que se justifica pela premissa de coesão variável com a profundidade, não representativa no cenário estudado.

A análise paramétrica permitiu observar uma relação linear entre a resistência não drenada do solo e a altura crítica do aterro, com estabilização dos fatores de capacidade de carga para  $S_u > 4$  kPa. Isso reforça a viabilidade do uso de valores médios de  $N_c$  em contextos práticos. Conclui-se que a combinação entre métodos empíricos e análises numéricas oferece uma base sólida e confiável para o dimensionamento de aterros sobre solos moles, desde que associada a uma investigação geotécnica adequada e representativa do campo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo a pesquisa e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) por todo o apoio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M.S. ; MARQUES, M.E. (2014) *Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho*. 2nd ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- BARONI, M (2016). *Comportamento geotécnico de argilas extremamente moles da baixada de Jacarepaguá, RJ*. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ.
- CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. (2011) *Fundações diretas: projeto geotécnico*. Oficina de Textos, São Paulo.
- COUTINHO, R. Q. (1986). *Aterro experimental instrumentado levado à ruptura sobre solos orgânicos – argilas moles da Barragem de Juturnaíba*. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ.
- DUNCAN, J. M.; POULOS, H. G. (1977) Modern techniques of analysis of engineering problems on soft clay. In: ASCE Conference on Soft Clay, Bangkok, *Proceedings...* ASCE, p. 197–226.
- GERSCOVICH, D. M. S. (2016) *Estabilidade de taludes*. 2nd ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- JEWELL, R. A. (1982) Limit equilibrium design method for reinforced embankments on soft foundations. In: International Conference on Geotextiles, Las Vegas. *Proceedings...* Las Vegas, v. 3, p. 671–676.
- MASSAD, F. (2009) *Solos marinhos da Baixada Santista: características e propriedades geotécnicas*. Oficina de Textos, São Paulo.
- MASSAD, F. (2010) *Obras de terra: ensaios e controle*. 2nd ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- ORTIGÃO, J. A. R. (1980) *Aterro experimental levado à ruptura sobre argila cinza do Rio de Janeiro*. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ.
- PALMEIRA, E. M.; FAHEL, A. R. S.; ORTIGÃO, J. A. R. (2002) Comportamento de encontros de ponte reforçados com geossintéticos sobre solos COBRAMSEG, *Anais...*, São Paulo.
- PINTO, C. S. (1994) *Aterros na Baixada: solos do litoral paulista*. ABMS – Núcleo Regional São Paulo.
- PINTO, C. S. (1996) Capacidade de carga de argilas com coesão linearmente crescente com a profundidade. *Jornal de Solos*, v.3, n.1.
- TERZAGHI, K. (1943) *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 510 p.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B. (1967) *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, New York.
- VESIC, A. S. (1975) *Bearing capacity of shallow foundations*. In: Foundation Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York, p. 121–147.