
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

QUESTÕES TEÓRICAS

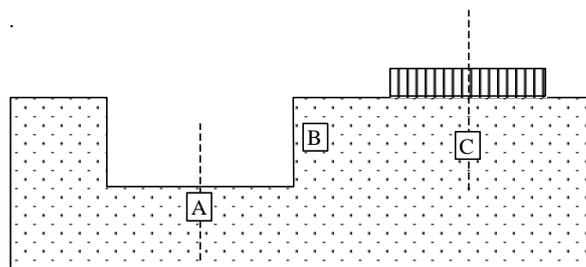
- 1) O que é envoltória de ruptura?
- 2) Quais os mecanismos que interferem na resistência ao cisalhamento dos solos?
- 3) Qual critério de ruptura adotado para solos?
- 4) Quais ensaios de laboratório utilizados para determinar a envoltória de resistência?
- 5) Qual a situação em que o comportamento da areia pode ser não drenado?
- 6) Explique a afirmativa: “A estabilidade de aterros sobre solos compressíveis é em geral estudada a curto prazo; isto é, sob condições não drenadas”.
- 7) Quais as vantagens do ensaio triaxial sobre o ensaio de cisalhamento direto?
- 8) Porque as areias densas aumentam de volume quando cisalhadas?
- 9) No plano de ruptura a tensão cisalhante corresponde à máxima atuante no elemento? Porque?
- 10) O que significa índice de vazios crítico?
- 11) O que acontece com a resistência de um solo quando este é submetido a um processo de adensamento?
- 12) Qual a diferença entre as envoltórias definidas em termos de tensão total e efetiva?
- 13) O que significa coesão aparente?
- 14) Deseja-se estudar a estabilidade de uma encosta. O solo local é arenoso e o N_A foi encontrado a 1m de profundidade, paralelo à superfície do terreno. Quais ensaios você sugeriria para determinar a resistência do solo? Análises de estabilidade devem ser conduzidas considerando-se comportamento drenado? Como as poro-pressões devem ser avaliadas?

QUESTÕES PRÁTICAS

- 1) Para um ensaio de cisalhamento direto em areia, com tensão normal na ruptura de 100kPa, tensão cisalhante de 35kPa pede-se determinar o ângulo de atrito, a direção e magnitude das tensões principais: (Resp: $\phi = 19,3^\circ$, $\sigma_1 = 149,34\text{kPa}$ e $\sigma_3 = 75,14\text{kPa}$)
- 2) Uma amostra de solo não coesivo foi submetida a variações nas tensões efetivas σ'_1 e σ'_3 , sendo a ruptura observada para $\sigma'_1 = 300\text{kPa}$ e $\sigma'_3 = 100\text{kPa}$. Determinar o ângulo de atrito e a inclinação do plano de ruptura. (Resp. $\phi = 30^\circ$, $\theta = 60^\circ$)
- 3) O quadro abaixo apresenta resultados de ensaios CID em areia média, nos quais os corpos de prova tinham o mesmo índice de vazios inicial. Obter os círculos de Mohr e estimar valores de ϕ para níveis de tensão entre 0 - 500kPa e 1.000 - 1.500kPa.

Ensaio	σ_c (kPa)	$(\sigma_d)_{ruptura}$ (kPa)
1	100	480
2	400	1.870
3	997	4.080
4	1.880	6.050
5	2.990	9.200

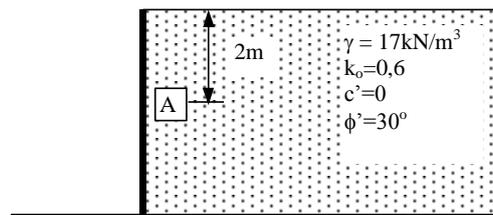
- 4) Desenhe os círculos de Mohr em termos de tensão total para a sequência de carregamento/descarregamento dos elementos assinalados abaixo:



- 5) Ensaios de cisalhamento direto executados em uma areia ($e = 0,56$) forneceram um ângulo de atrito de 40° . Se no campo, o índice de vazios é igual a 0,8 você recomendaria para projeto a execução de novos ensaios ou adotaria o valor de $\phi = 40^\circ$? Justifique.
- 6) Indique para cada caso abaixo qual amostra apresentaria maior resistência: amostras A e B extraídas a uma profundidade de 3m de um solo argiloso com $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ e OCR igual a 3. Amostra A foi

adensada para tensão confinante de 60kPa e cisalhada não drenadamente. Amostra B foi submetida a ensaio CU, sendo adensada para tensão confinante de 250kPa.

- 7) Considere que o elemento da figura abaixo está submetido inicialmente às condições geostáticas. O N.A. está a 20m de profundidade. Caso a parede se movimente horizontalmente para a esquerda, aliviando o suporte lateral, quais seriam as tensões vertical e horizontal, neste elemento, no instante da ruptura. E se a parede fosse pressionada na direção do solo? (sugestão: utilize o círculo de Mohr) (Resp: Alívio: $\sigma'_1 = \sigma'_v = 34\text{kPa}$, $\sigma'_3 = \sigma'_h = 11\text{kPa}$; Aumento: $\sigma'_1 = \sigma'_v = 34\text{kPa}$, $\sigma'_3 = \sigma'_h = 103\text{kPa}$)



- 8) Indique para cada um dos casos abaixo qual amostra apresenta maior resistência:
- Ensaio CD: amostra A - areia densa saturada; amostra B - areia fofa saturada. (Resp.: $\tau_{fA} > \tau_{fB}$)
 - Amostras A e B: argila N.A. Consolidação da amostra A para uma tensão confinante de 100kPa, consolidação da amostra B para 80 kPa. Ambas amostras foram cisalhadas para uma tensão efetiva inicial de 80 kPa, sem permitir a drenagem.
 - Amostras A e B: argila N.A. Amostra A submetida a ensaio CD e amostra B submetida a ensaio CU. (Resp.: $\tau_{fA} > \tau_{fB}$)
- 9) Os resultados abaixo foram obtidos em ensaios de cisalhamento direto em amostras de areia compactada. Determine os parâmetros de resistência e comente se haveria ruptura em um plano em que atuam $\tau = 122\text{kPa}$ e $\sigma = 246\text{kPa}$

Ensaio	$\tau_{ruptura}$ (kPa)	$(\sigma)_{ruptura}$ (kPa)
1	36	50
2	80	100
3	157	200
4	235	300

- 10) Os resultados abaixo foram determinados em ensaios consolidado-não drenado, com medida de poro-pressão. Determine os parâmetros de resistência totais e efetivos.

Ensaio	$(\sigma)_c$ (kPa)	$(\sigma)_d$ (kPa)	u (kPa)
1	150	100	80
2	300	202	164
3	600	410	330

- 11) Um cisalhamento não drenado, com medida de poro-pressão, foi executado em amostra de solo argiloso, após esta ter sido adensada para uma tensão efetiva de 300kPa. Plote os círculos de Mohr em tensões totais e efetivas, além da variação do parâmetro de poro-pressão A em função da deformação axial

$\Delta l/l$ (%)	0	1	2	4	8	12
$(\sigma)_d$ (kPa)	0	138	240	312	368	410
u (kPa)	0	54	79	89	91	86

- 12) Os parâmetros efetivos de um solo argiloso são $c'=15\text{kPa}$ e $\phi'=29^\circ$. Em um ensaio CIU, sendo a amostra adensada para $\sigma_c=250\text{kPa}$, observou-se a ruptura para $\sigma_d=134\text{kPa}$. Qual o valor da poro-pressão na ruptura.
- 13) Em um ensaio triaxial, a amostra foi adensada inicialmente para $\sigma_c=100\text{kPa}$, em seguida, com as drenagens fechadas, aumentou-se a tensão confinante para 180kPa e mediu-se um acréscimo de poro-pressão de 75kPa. A amostra está saturada?
- 14) Deseja-se lançar um aterro com 3m de altura e γ_t igual a 20kN/m³ sobre o perfil abaixo. Ensaio triaxiais CU, executados em uma amostra extraída do centro da camada argilosa forneceram os resultados abaixo.

Pede-se

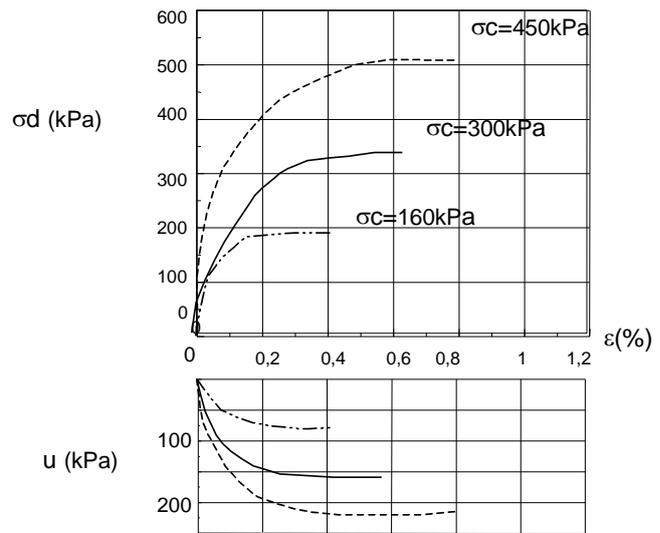
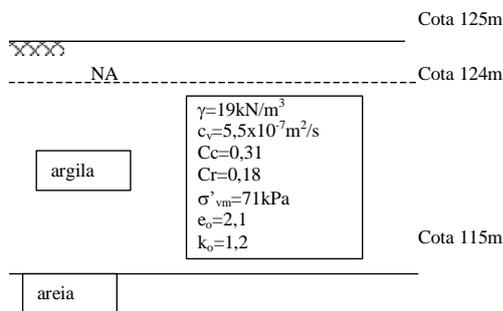
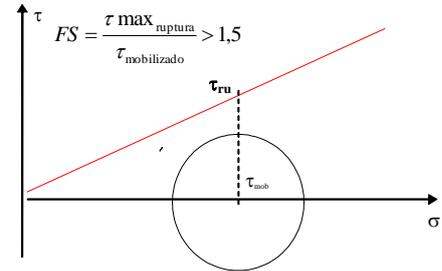
- i) Desenhar no diagrama as envoltórias de resistência ao cisalhamento total e efetiva (Resp.: $c=10,7\text{kPa}$ e $\phi=21,4^\circ$; $c'=0\text{kPa}$ e $\phi'=20,4^\circ$)
- ii) Determinar os parâmetros A e B de poro-pressão, para o nível de deformação de 0,2%, preenchendo a tabela abaixo: (Resp.: σ_d (Kpa)=192, 341, 504; $\Delta\sigma_d$ (Kpa)=190, 280, 400; Δu (Kpa)=75, 150, 200; B=1 (todos); A=0,39, 054,050)

Ensaio	$\Delta\sigma_c$ (Kpa)	$\Delta\sigma_d$ (Kpa)	Δu (Kpa)	B	A
1	160				
2	300				
3	450				

- iii) Desenhar os círculos de Mohr em tensão total e efetiva, em conjunto com a envoltória efetiva, para a seqüência de eventos abaixo discriminados, assumindo que o aterro impõe $\Delta\sigma_v=0,9\Delta q$ e $\Delta\sigma_h=0,1\Delta q$:

- antes da construção (Resp.: $p=(\sigma_1+\sigma_3)/2=100,5\text{kPa}$, $p'=(p-u)=60,5\text{kPa}$, $q=(\sigma_1-\sigma_3)/2=5,5\text{kPa}$)
- imediatamente após a construção (Resp.: $p=100,5\text{kPa}$, $p'=63,8\text{kPa}$, $q=18,5\text{kPa}$)

- iv) ao final do adensamento primário (Resp.: $p=130,5\text{kPa}$, $p'=90,5\text{kPa}$, $q=18,5\text{kPa}$) Avaliar se a altura máxima de aterro para que seja atendida a segurança da estrutura, definindo como fator de segurança a relação: (Resp.: $h < 3,5\text{m}$)



- 15) Considere que um corpo de prova de um material arenoso foi submetido a um ensaio triaxial drenado. Após a fase de cisalhamento ($\sigma'_c = 300\text{kPa}$) o corpo apresentou $e=0,90$. Durante a fase de cisalhamento, observou-se que a variação de volume foi nula. Considere que um segundo corpo de prova, preparado com o mesmo material, apresentou $e=0,90$ para $\sigma'_c = 30\text{kPa}$. Quais as curvas típicas obtidas durante a fase de cisalhamento deste segundo cp?
- 16) Em um ensaio triaxial, uma amostra é adensada para tensão confinante de 200kPa . As válvulas de drenagem são então fechadas e a pressão confinante é aumentada para 350kPa , medindo-se a poropressão de 141kPa . Ainda sob condições não drenadas, a carga vertical é aumentada, obtendo-se os valores abaixo. Pede-se:
- Curva tensão x deformação;
 - Módulos de Young E_{inicial} e E_{50}
 - Parâmetros de poro-pressão A e B no instante da ruptura. Considere B inalterado durante o cisalhamento

Deformação vertical (%)	0	2	4	6	8	10
Tensão normal vertical (kPa)	350	551	602	625	632	630
Poropressão (kPa)	141	241	237	222	212	206

17) Sobre um depósito argiloso, saturado ($\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$, $e_o = 2,7$; $k_o = 0,48$), normalmente adensado, com 6m de espessura e assente sobre uma camada impermeável será executada uma estrutura para implantação de uma refinaria. Inicialmente será lançado um aterro arenoso de grandes dimensões. Somando os dois carregamentos haverá um acréscimo de tensão na superfície de 20kPa. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto no solo do aterro e triaxiais UU na argila, cujos resultados estão mostrados abaixo.

Ensaio de cisalhamento direto, sob esforço vertical constante de 1,5kN				
Δh (mm)	T (kN)	A_c (m ²)		
0	0	0,01		
2,0	0,571	0,0098		
4,0	0,844	0,0096		
5,9	0,988	0,00941		
7,7	1,002	0,00923		
9,1	0,98	0,00909		

Ensaio UU para tensão confinante de 100kPa					
Δh (mm)	ϵ_a (%)	A_c (cm ²)	F_{axial} (kgf)	σ_d (kPa)	Δu (kPa)
0	0	48,64	0		0,0
3,87	10,19	54,16	3,8		3,9
6,16	16,21	58,05	5,1		3,4
8,42	22,17	62,49	5,2		3,1
10,69	28,14	67,69	5,5		2,5
14,12	37,16	77,41	6,05		2,0

Pede-se:

- a. Traçar a curva do ensaio de cisalhamento direto
- b. Traçar a curva tensão x deformação
- c. Traçar a curva Δu x ϵ_a
- d. Definir os parâmetros de resistência do aterro e da fundação
- e. Calcular o parâmetro de poropressão A na ruptura
- f. Calcular E_{50} (0,5pts)
- g. Assumindo que a construção irá causar um acréscimo de tensão vertical e horizontal, no centro da camada, da ordem de 30% e 5% do valor da carga aplicada, respectivamente, avaliar a estabilidade para as seguintes condições:
 - i. Final de construção, considerando tensões totais (resistência não drenada) Final de construção, considerando tensões efetivas e $\phi' = 19^\circ$
 - ii. A longo prazo, considerando tensões efetivas e $\phi' = 19^\circ$

18) Três amostras foram extraídas, a 3m de profundidade (N.A. no nível do terreno), de uma camada de solo argiloso ($\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$; $k_0 = 0,6$; $\text{OCR} = 3$). As amostras A e B foram submetidas a ensaios triaxiais CU, sendo a amostra A adensada para $\sigma_c = 20\text{kPa}$ adensada para $\sigma_c = 100\text{kPa}$. A amostra C foi adensada para 100kPa e cisalhada com drenagem aberta. Pede-se:

- ii) Definir o OCR da amostra ao final da etapa de consolidação
- iii) Verificar se as amostras A e B geram poropressão positiva durante o cisalhamento
- iv) Indicar qual amostra apresentaria maior resistência, explicando sua resposta

19) Na tabela abaixo, apresenta-se resultados de ensaio de cisalhamento direto, realizado em amostra de $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 3\text{cm}$, sob esforço vertical constante de 1200 N . (valores negativos denotam expansão) Pede-se:

- i) Esboçar as curvas tensão cisalhante X deslocamento horizontal e deslocamento vertical X deslocamento horizontal
- ii) Determine a tensão cisalhante e normal para as condições de ruptura de pico e residual
- iii) Definir se o solo irá se comportar como denso ou fofo. Explique a resposta
- iv) Desenhar as envoltórias de resistência para as condições de pico e residual, indicando os parâmetros c' e ϕ'

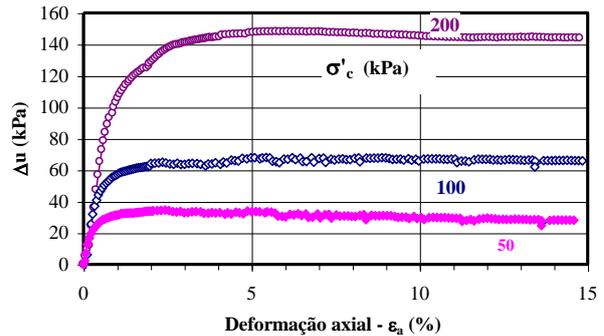
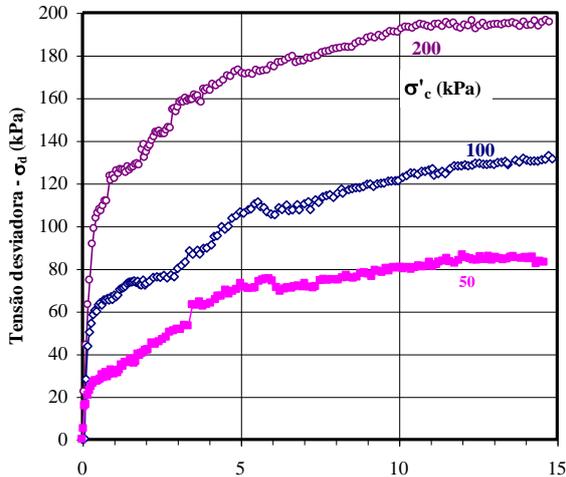
Desloc. Horiz. (mm)	Força Horiz. (N)	Desloc Vertical (mm)			
0	0	0			
2,03	571,29	-0,01			
4,06	844,47	-0,16			
5,97	988,29	-0,4			
7,75	1002,51	-0,57			
9,14	766,3	-0,60			
10,16	758,06	-0,59			

20) Será executado um radier com 6m de diâmetro o qual transmitira uma tensão, na superfície do terreno, de 300kPa . O perfil geotécnico consiste em uma argila siltosa, saturada, de 12m de espessura com peso específico de 18kN/m^3 e $k_0 = 0,5$. Admitindo que no centro da camada, sob o eixo de simetria do carregamento, os acréscimos de σ_1 e σ_3 sejam respectivamente $0,3q$ e $0,08q$, pede-se

- A) determinar as envoltórias de tensão total e efetiva
- B) calcular o módulo de Young correspondente a uma deformação axial de $2,5\%$ ($E_{2,5\%}$) para o ensaio $\sigma'_c = 100\text{kPa}$
- C) avaliar as condições de estabilidade com base na análise das tensões efetivas e envoltura de resistência nas situações:
 - a) final da construção

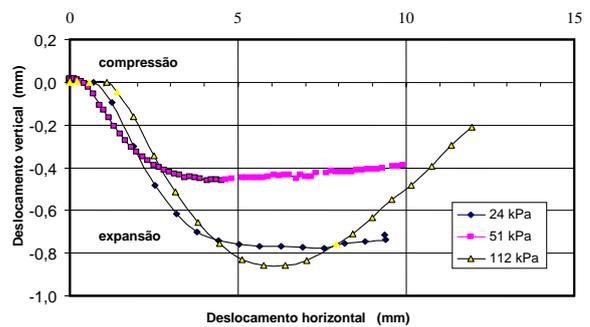
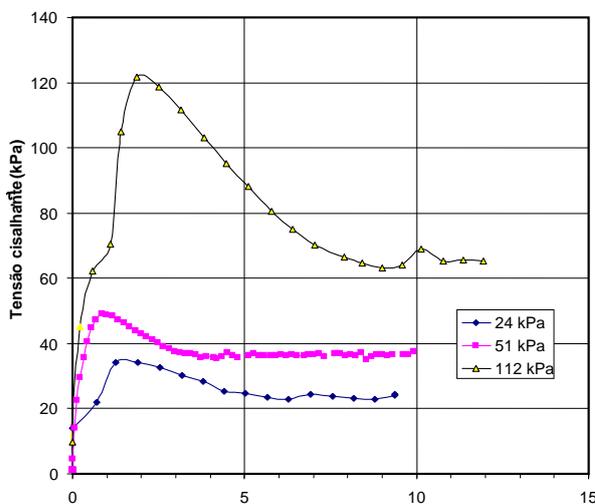
b) após o adensamento

D) avaliar as condições de estabilidade da fundação caso fossem realizados somente ensaios UU e a envoltória de tensões totais fornecesse $su=20\text{kPa}$



21) Os resultados abaixo foram obtidos em ensaios de cisalhamento direto em amostras de areia com $e=0,36$. Pede-se

- Determinar a envoltória de resistência
- Explicar o porque neste ensaio não se pode determinar o modulo de Young (E)
- Determinar a tensão na ruptura que seria obtida em um ensaio triaxial CD no mesmo material, adensado para uma tensão confinante de 75kPa
- Comentar as diferenças em termos da curva tensão x deformação, variação de volume x deformação e envoltória de resistência se no campo o solo apresentasse um índice de vazios superior ao critico



22) Sobre um aterro arenoso será executada uma estrutura para implantação de uma refinaria. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto no solo do aterro e triaxiais UU na argila, cujos resultados estão mostrados abaixo.

Ensaio de cisalhamento direto, sob esforço vertical constante de 1,5kN				
Δh (mm)	T (kN)	A_c (m ²)		
0	0	0,01		
2,0	0,571	0,0098		
4,0	0,844	0,0096		
5,9	0,988	0,00941		
7,7	1,002	0,00923		
9,1	0,999	0,00909		

Ensaio UU para tensão confinante de 100kPa					
Δh (mm)	ε_a (%)	A_c (cm ²)	F_{axial} (kgf)	σ_d (kPa)	Δu (kPa)
0,000	0,00	48,64	0,0	0,0	0,0
3,87	10,19	54,16	2,9	3,7	3,9
6,16	16,21	58,05	3,0	2,7	3,4
8,42	22,17	62,49	3,1	1,9	3,1
10,69	28,14	67,69	3,3	1,1	2,5
14,12	37,16	77,41	3,4	0,1	2,0

Pede-se:

- h. Definir os parâmetros c' , ϕ' e S_u
- i. Calcular os parâmetros de poropressão A_{50} e B

23) Será executada uma estrutura sobre o solo de fundação argiloso, espessura com peso específico de 17kN/m³ e $k_o = 0,65$, cujos parâmetros efetivos foram $e c' = 0$ e $\phi' = 29^\circ$ ($A=0,3$). Ensaios adicionais UU forneceram $s_u = 25$ kPa. Considerando que a estrutura irá gerar incrementos de tensão a 5m de profundidade iguais a $\Delta\sigma_z = 25$ kPa; $\Delta\sigma_x = 10$ kPa e $\Delta\tau_{xz} = 10$ kPa. Pede-se

- i) calcular as variações das tensões principais
- ii) Traçar os círculos de Mohr, para as seguintes condições:
 - (i) Ao final de construção
 - i. Análise em tensões efetivas
 - ii. Análise em tensões totais
 - (ii) A longo prazo
 - i. Análise em tensões efetivas

24) Será executada escavação em uma camada de argila mole. Foram realizados ensaios de resistência cujos resultados estão apresentados abaixo:

- i) Ensaios UU_{sat} = 14 kN/m³, $e_o = 3,8$,

$\varepsilon(\%)$	$\sigma_1(\text{kPa})$			
$\sigma_1(\text{kPa})$	100			
0	100			
0,25	101,8			
1,0	115			
1,5	117			
2,5	118			
3,0	117,5			

ii) Ensaios CU em amostras com 75mm de comprimento e 37,5mm de diâmetro, para uma tensão de confinamento de 400kPa,

Δh	σ_d	Δu			
(mm)	(kPa)	(kPa)			
0	0	0,0			
1,5	229	94			
3,0	279	94			
4,5	291	80			
6,0	286	69			

Pede-se

ii) Determinar a envoltória efetiva, definindo os valores de c' e ϕ' ?

ii) Determinar a envoltória total, para condição não drenada?

(Dado que a condição crítica é ao final de construção, estime, em termos de tensão total, até que profundidade poder-se-ia teoricamente escavar a argila, sem ter problemas de estabilidade?)