Apresentação de aula de geotecnia · Liquefação

Desencadeamento da liquefação pelo CPT

Aula: desencadeamento da liquefação a partir do CPT; uma leitura do cone é resolvida manualmente de ponta a ponta por dois métodos (Boulanger–Idriss, Robertson–Wride), e as demais leituras, em tabelas.

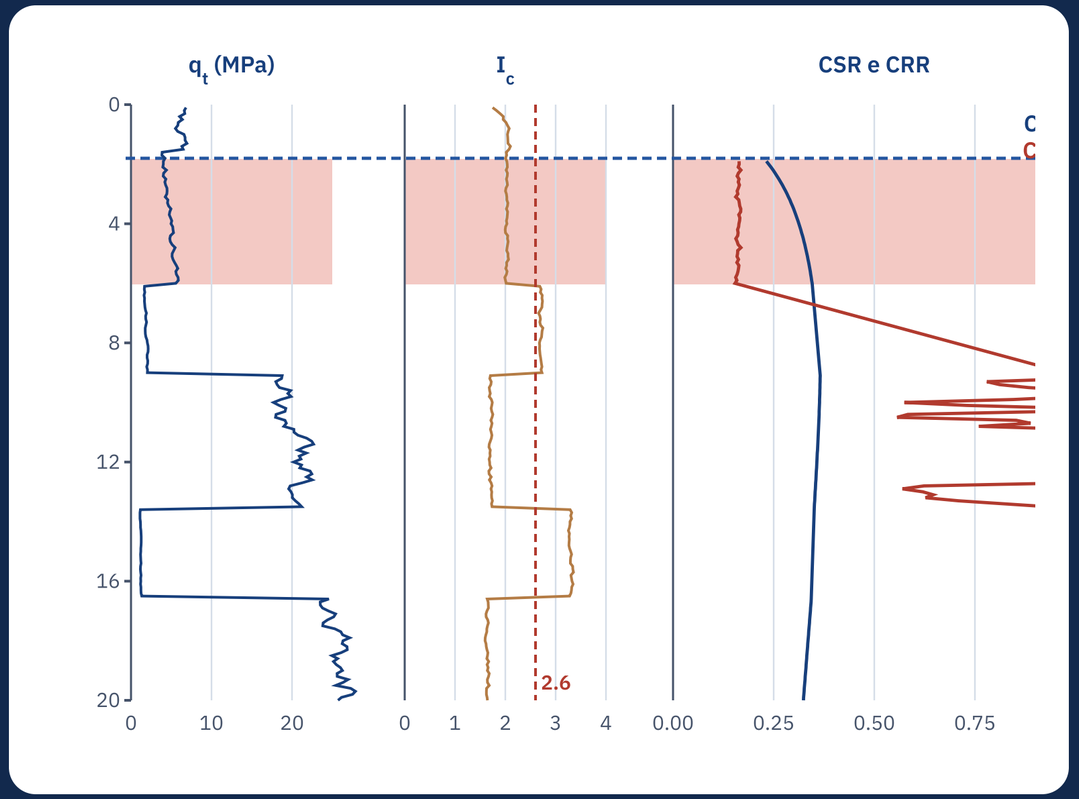
Dados do cone · Ic

Dois métodos

CSR · CRR · FS

Zonas

Resolução manual



Introdução

O que veremos nesta aula?

Determinação, a partir do registro do cone (q_c, f_s, u_2), da **resistência de ponta corrigida q_t**, da **razão de atrito R_f** e do **índice de comportamento do solo I_c**

Estimar o tipo de solo, o peso específico e o teor de finos **a partir dos dados do cone** (a tabela de camadas não é preenchida)

Dois conjuntos completos: Boulanger–Idriss (2014) e Robertson–Wride (1998, NCEER); em cada um, a normalização, a curva CRR, o MSF e o K_σ são internamente consistentes

CSR, **FS = CRR/CSR**, leituras descartadas, **zonas** e espessura liquefeita

Uma única leitura (4.00 m) de uma sondagem, calculada à mão por dois métodos; as demais leituras na tabela, com as mesmas etapas

ROTEIRO DA AULA

Cada tópico é tratado em **três etapas**:

1 · **Teoria**: fórmula e justificativa

2 · **Enunciado**: dados e o que se pede

3 · **Solução**: passo a passo, com números

Exemplo: CPT-1 (nível do lençol freático a 1.80 m; 20 m de profundidade, intervalo de 5 cm); a_{max} = 0.35 g, M = 7.5, razão de área líquida a = 0.80, $FS_{required}$ = 1.20.

q_t, R_f e unidades

TEORIA

Como o **cone** fornece um registro quase contínuo (intervalo de leitura de 1–5 cm), não há tabela de camadas a ser inserida.

O tipo de solo, o peso específico e o teor de finos são estimados **a partir dos dados do cone**.

As **consequências da liquefação** — recalque, espalhamento lateral, perda de capacidade de carga — estão fora do escopo desta versão.

A resistência de ponta corrigida do cone é calculada pela relação $\mathbf{q_t} = \mathbf{q_c} + (1 - a)\cdot\mathbf{u_2}$, em que a é a razão de área líquida do cone (0.65–0.85; valor usual 0.80).

Em argilas moles e siltes nos quais o valor de $\mathbf{u_2}$ está muito acima do hidrostático, a correção é importante, ao passo que nas areias permanece pequena; se $\mathbf{u_2}$ não for registrado, adota-se $\mathbf{q_t} = \mathbf{q_c}$.

$$q_t = q_c + (1 - a)\, u_2 \qquad R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100\,\%$$

γ a partir do CPT; duas profundidades do nível do lençol freático

TEORIA

O peso específico é estimado a partir dos dados do CPT em cada leitura; **R_f** é expresso em %, e o valor é mantido entre 1.5 γ_w e 2.5 γ_w.

O peso específico é integrado a partir da superfície; alternativamente, usam-se dois valores constantes: γ acima do nível do lençol freático e γ_{sat} abaixo dele.

Admite-se que a poropressão é hidrostática a partir do nível do lençol freático; para **C_N** e **I_c** utiliza-se o nível do lençol freático da época do ensaio e, para CSR e K_σ, o nível do lençol freático de projeto.

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = 0.27 \log R_f + 0.36 \log \frac{q_t}{P_a} + 1.236 \qquad \sigma_v = \int \gamma \, dz \qquad u = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_v = \sigma_v - u$$

I_c e expoente n

TEORIA

O índice de comportamento do solo é calculado com a relação I_c = [(3.47 – log Q)² + (log F + 1.22)²]^0.5.

O expoente n assume o valor 0.5 em areias e 1.0 em argilas e é determinado pela iteração de Robertson & Wride (1998).

O perfil de sondagem nos desenhos baseia-se nesta classificação; uma sequência mais fina que h_{min} é incorporada à sequência vizinha mais longa.

$$I_c = \left[(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1.22)^2\right]^{0.5} \qquad Q = \frac{q_t - \sigma_v}{P_a}\left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^n \qquad F = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \times 100\,\%$$

Intervalo de I_c	< 1.31	1.31 – 2.05	2.05 – 2.60	2.60 – 2.95	2.95 – 3.60	> 3.60
Solo (Robertson 1990)	areia pedregulhosa – compacta	areia: limpa – siltosa	mistura de areia	mistura de silte	argila	orgânico

Qual leitura é avaliada?

TEORIA

Uma leitura é avaliada quando se situa abaixo do nível do lençol freático de projeto, a uma profundidade não superior a z_{max}, e em solo que se comporta como areia.

Os solos com valor de I_c acima de $I_{c,lim}$ (padrão 2.6) são considerados semelhantes a argila; esses solos ficam reservados à verificação de amolecimento cíclico.

A fronteira entre o comportamento tipo areia e o tipo argila não é nítida; recomenda-se repetir a análise com $I_{c,lim}$ = 2.4, 2.6 e 2.8.

Em uma leitura em que a resistência de ponta líquida $q_t - \sigma_v$ não é positiva, o índice de comportamento do solo não pode ser definido e a leitura não é avaliada; as leituras eliminadas permanecem em todas as tabelas, com as suas justificativas.

$q_t \rightarrow q_{c1N} \rightarrow q_{c1Ncs}$

TEORIA

Como, na normalização de Boulanger & Idriss (2014), o expoente depende do resultado, C_N é obtido por iteração e, na relação de m, o valor de q_{c1Ncs} é mantido entre 21 e 254.

Na relação FC = 80(I_c + C_{FC}) − 137, C_{FC} é o parâmetro de ajuste da correlação entre I_c e o teor de finos; 0 corresponde à correlação geral, e ±0.29 é um desvio-padrão dessa correlação.

Como a dispersão da correlação é grande, é mais adequado um valor de C_{FC} específico do local, determinado a partir dos teores de finos de laboratório de amostras de sondagens adjacentes aos pontos de CPT, o qual deve ser determinado separadamente para cada unidade geológica.

$$q_{c1N} = C_N \frac{q_t}{P_a} \qquad C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.7 \qquad m = 1.338 - 0.249\, q_{c1Ncs}^{0.264}$$

$$FC = 80\,(I_c + C_{FC}) - 137 \qquad \Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6}\right) \exp\left[1.63 - \frac{9.7}{FC+2} - \left(\frac{15.7}{FC+2}\right)^2\right] \qquad q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

CRR, MSF e K_σ

TEORIA

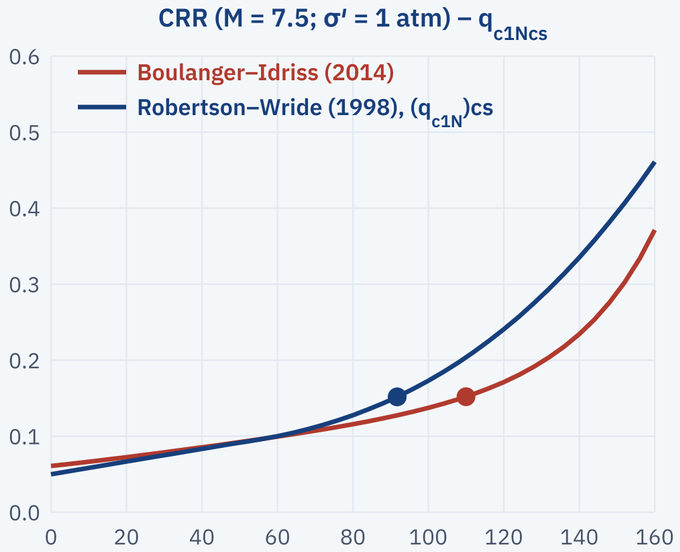
A curva de resistência de Boulanger & Idriss (2014) é a curva determinística apresentada no relatório e baseia-se no percentil 16 dos dados de casos históricos (constante 2.80).

A curva CRR(M=7.5; σ′=1) é obtida a partir do valor de q_{c1Ncs}; quando q_{c1Ncs} é superior a 211, adota-se o valor 211, pois o limite de C_σ é atingido.

O σ'_v da relação de K_σ é a tensão efetiva correspondente ao nível do lençol freático de projeto.

$$CRR_{7.5,1} = \exp\left[\frac{q}{113} + \left(\frac{q}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q}{140}\right)^3 + \left(\frac{q}{137}\right)^4 - 2.80\right] \qquad q = q_{c1Ncs}$$

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1)(8.64e^{-M/4} - 1.325) \qquad MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q}{180}\right)^3 \qquad K_\sigma = 1 - C$$



Kc, CRR e MSF

TEORIA

A resistência de cone corrigida é calculada pela relação $(q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N}$; K_c depende de Ic e assume o valor 1 para Ic ≤ 1.64.

Em areia limpa com 1.64 < Ic < 2.36 e razão de atrito inferior a 0.5%, adota-se $K_c = 1$ e não se aplica a correção para finos.

A curva de areia limpa termina em $(q_{c1N})_{cs} = 160$; o módulo prolonga a mesma relação cúbica até 250 ($CRR_{7.5} = 1.5$) e assinala a leitura.

$$q_{c1N} = C_Q \frac{q_t}{P_a} \quad C_Q = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^n \le 1.7 \qquad (q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N} \qquad K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88$$

$$CRR_{7.5} = 0.833 \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} + 0.05 \; (< 50) \quad 93 \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000}\right)^3 + 0.08 \; (50 \ldots 160) \qquad MSF = \frac{102.24}{M^{2.56}} \quad K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{f-1}$$

CSR e a relação de r_d dos dois métodos

TEORIA

A razão de tensões cíclicas é expressa como CSR = 0.65 (σ_v/σ'_v) a_{max} r_d, em que σ_v e σ'_v são as tensões calculadas em relação ao nível do lençol freático de projeto.

Para o coeficiente de redução de tensões r_d, o método B&I; utiliza a relação de Idriss e o método R&W; a relação de Liao–Whitman; as correções de magnitude e de tensão de sobrecarga são aplicadas à resistência, e não à solicitação.

$$CSR = 0.65\,\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\,a_{max}\,r_d \qquad r_d^{BI} = \exp[\alpha + \beta M] \qquad r_d^{RW} = 1.0 - 0.00765z\ (z \le 9.15\ \mathrm{m})$$

z (m)	2	4	6	8	10	15	20
r_d de Boulanger–Idriss (M = 7.5)	0.991	0.972	0.949	0.924	0.896	0.822	0.750
r_d de Robertson–Wride	0.985	0.969	0.954	0.939	0.907	0.773	0.640

FS = CRR / CSR

TEORIA

Cada leitura representa metade da distância até a leitura acima e até a abaixo dela; essa distância representativa não excede 0.25 m em cada sentido ou, se maior, 3/4 do intervalo usual de leitura.

Uma lacuna no registro não é extrapolada para os resultados; permanece uma série não avaliada como “sem leitura” e é listada em um aviso.

Leituras consecutivas com o mesmo resultado formam uma sequência; uma sequência com espessura inferior a h_{min} (padrão 0.10 m) assume o resultado da vizinha mais longa, e sequências vizinhas com o mesmo resultado formam zonas.

Cada método é um conjunto indivisível; o coeficiente de redução de tensões, a normalização, a correção para areia limpa, os coeficientes de magnitude e de tensão de sobrecarga e a curva de resistência são derivados em conjunto a partir de um banco de dados de casos.

As fontes dos dois métodos preveem que os componentes de um método não sejam misturados com os do outro; no módulo, a escolha do método altera todos esses componentes em conjunto.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \qquad \mathrm{FS} < 1 : \ \mathrm{liquefaz} \qquad 1 \leq FS < FS_{req}\,(1.20) : \ \mathrm{marginal}$$

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Leitura	$q_c = 4.956$ **MPa,** $f_s = 46.2$ **kPa,** $u_2 = 21.6$ **kPa; razão de área líquida** $a = 0.80$
Campo	**nível do lençol freático** $z_w = 1.80$ **m (o de projeto é o mesmo); peso específico a partir do CPT (80 leituras de 0 a 4 m)**
Sismo	$a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$; $C_{FC} = 0$; **Robertson–Wride** $f = 0.7$; $FS_{req} = 1.20$

PEDE-SE

q_t, σ'_v, I_c; com Boulanger–Idriss e Robertson–Wride, **q_{c1Ncs}, CRR, CSR, FS**.

Solução (1/8)

SOLUÇÃO

1 Resistência de ponta corrigida e razão de atrito

$$q_t = q_c + (1-a)u_2 = 4956 + (1-0.80)(21.6) = \mathbf{4{,}960.32}\ \text{kPa}$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100 = \frac{46.2}{4{,}960.32} \times 100 = \mathbf{0.9314}\ \%$$

2 Peso específico (Robertson–Cabal)

$$\gamma = (0.27 \log R_f + 0.36 \log \tfrac{q_t}{P_a} + 1.236)\gamma_w = (1.8360)(9.81) = \mathbf{18.01}\ \text{kN/m}^{\mathbf{3}}$$

3 Tensões

$$\sigma_v = \sum \tfrac{1}{2}(\gamma_{k-1} + \gamma_k)\Delta z = \mathbf{73.64}\ \text{kPa} \qquad u = 9.81(4.00 - 1.80) = 21.58\ \text{kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = 73.64 - 21.58 = \mathbf{52.05}\ \text{kPa}$$

Tensão vertical efetiva **σ′ᵥ = 52.05 kPa**.

Solução (2/8)

SOLUÇÃO

4 Resistência de ponta líquida e F

$$q_t - \sigma_v = 4{,}960.32 - 73.64 = \mathbf{4{,}886.68}\ \mathrm{kPa}$$

$$F = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \times 100 = \frac{46.2}{4{,}886.68} \times 100 = \mathbf{0.9454}\ \%$$

5 Iteração do expoente n (Robertson–Wride): primeiro n = 1.0 (tentativa de argila)

$$Q = \frac{q_t - \sigma_v}{P_a}\left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^{1} = 93.88$$

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log 93.88)^2 + (\log 0.9454 + 1.22)^2} = \mathbf{1.9162} \le 2.6 \ \Rightarrow\ \text{não é argila}$$

Solução (3/8)

SOLUÇÃO

6 Tenta-se n = 0.5 (areia)

$$Q = 48.2278 \left(\frac{101.325}{52.05} \right)^{0.5} = 67.29$$

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log 67.29)^2 + (\log 0.9454 + 1.22)^2} = \mathbf{2.0312} \leq 2.6 \;\Rightarrow\; n = 0.5$$

I_c = 2.031 ≤ 2.6: não é do tipo argila, a leitura é avaliada.

Solução (4/8)

SOLUÇÃO

7 Teor de finos ($C_{FC} = 0$)

$$FC = 80\,(I_c + C_{FC}) - 137 = 80(2.0312) - 137 = \mathbf{25.50\ \%}$$

8 m e C_N são interdependentes: iteração com q_{c1Ncs} ($x = q_t/P_a = 48.955$, $\sigma'_v = 52.05$)

Iteração	q_{c1Ncs} (entrada)	m	C_N	$q_{c1N} = C_N q_t/P_a$	Δq_{c1N}	q_{c1Ncs} (saída)
1	48.955	0.6425	1.5341	75.100	44.128	119.227
2	119.227	0.4582	1.3569	66.427	42.590	109.017
3	109.017	0.4788	1.3756	67.342	42.752	110.094
4	110.094	0.4766	1.3736	67.242	42.734	109.977
…	…	…	…	…	…	…
13	109.988	0.4768	1.3738	67.252	42.736	109.988

Converge em 13 iterações: **m = 0.4768, C_N = 1.3738, q_{c1N} = 67.252, Δq_{c1N} = 42.736 → q_{c1Ncs} = 109.988**.

Solução (5/8)

SOLUÇÃO

9 Resistência básica (M = 7.5; 1 atm), MSF e K_σ (q_{c1Ncs} = 109.99)

$$CRR_{7.5,1} = \exp[q/113 + (q/1000)^2 - (q/140)^3 + (q/137)^4 - 2.80] \quad (q = 109.99)$$

$$CRR_{7.5,1} = \exp[-1.8840] = \mathbf{0.1520}$$

$$MSF_{max} = 1.09 + (109.99/180)^3 = 1.3181$$

$$MSF = 1 + (1.3181 - 1)(8.64e^{-7.5/4} - 1.325) = \mathbf{1.0000}$$

$$C_\sigma = 1/(37.3 - 8.27(109.99)^{0.264}) = 0.1150$$

$$K_\sigma = 1 - 0.1150 \ln(52.05/101.325) = \mathbf{1.0766}$$

$CRR_{7.5;1}$ = **0.1520**; MSF = **1.0000**; K_σ = **1.0766** → CRR = **0.1636**.

Solução (6/8)

SOLUÇÃO

10 Solicitação (r_d de Idriss) e fator de segurança

$$r_d = \exp[\alpha + \beta M] = \exp[-0.1971 + 0.0225(7.5)] = 0.9718$$

$$CSR = 0.65\,\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\,a_{max}\,r_d = 0.65\left(\frac{73.64}{52.05}\right)(0.35)(0.9718) = \mathbf{0.3127}$$

$$CRR = CRR_{7.5,1}\cdot MSF\cdot K_\sigma = 0.1520(1.0000)(1.0766) = 0.1636$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0.1636}{0.3127} = \mathbf{0.523}$$

Boulanger–Idriss: **FS = 0.523 < 1**, ocorre liquefação.

Solução (7/8)

SOLUÇÃO

11 C_Q e q_{c1N} (mesmo n = 0.5)

$$C_Q = (P_a/\sigma'_v)^{0.5} = (101.325/52.05)^{0.5} = 1.3952$$

$$q_{c1N} = C_Q \frac{q_t}{P_a} = 1.3952(48.955) = 68.300$$

12 K_c (I_c = 2.031: 1.64 < I_c < 2.36, mas F = 0.945% ≥ 0.5: HÁ correção para finos)

$$K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88 = \mathbf{1.3430}$$

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c \, q_{c1N} = 1.3430(68.300) = \mathbf{91.727}$$

Em Robertson–Wride, o efeito dos finos é o **multiplicador K_c** (1.343); em Boulanger–Idriss, Δq_{c1N} é **somado** (+42.7); $(q_{c1N})cs$ = 91.73, q_{c1Ncs} = 109.99.

Solução (8/8)

SOLUÇÃO

13 Resistência, solicitação (Liao–Whitman r_d; $K_\sigma = 1$, pois $\sigma'_v < P_a$) e FS

$$CRR_{7.5} = 93\left(\frac{91.727}{1000}\right)^3 + 0.08 = 0.1518 \qquad MSF = \frac{102.24}{7.5^{2.56}} = 0.9996$$

$$r_d = 1 - 0.00765(4) = 0.9694 \qquad CSR = 0.65\left(\frac{73.64}{52.05}\right)(0.35)(0.9694) = 0.3120$$

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR}\,MSF\,K_\sigma = \frac{0.1518}{0.3120}(0.9996)(1) = \mathbf{0.486}$$

Os dois métodos chegam à mesma conclusão: **Boulanger–Idriss FS = 0.523**, **Robertson–Wride FS = 0.486**; ambos < 1. A diferença entre eles decorre da correção do teor de finos e de r_d.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Sondagem	**CPT-1: 20 m, 400 leituras com intervalo de 5 cm; nível do lençol freático 1.80 m**
Métodos	**Boulanger–Idriss e Robertson–Wride; cada leitura é resolvida com as etapas do Exemplo 1**

PEDE-SE

Para a leitura de cada metro: **q_t, R_f, I_c, solo, σ'_v, q_{c1Ncs}, CSR, CRR, FS** (dois métodos) e a decisão.

Solução (1/2)

SOLUÇÃO

z (m)	q_t (MPa)	R_f %	I_c	Solo	σ'_v	q_{c1Ncs} (BI)	CSR (BI)	FS (BI)	$(q_{c1N})cs$ (RW)	FS (RW)	Decisão (BI / RW)
1	6.58	2.27	2.04	areia	19.4	–	–	–	–	–	*acima do NA*
2	4.02	0.93	2.04	areia	36.0	108.4	0.238	0.691	90.1	0.626	Liquefaz / Liquefaz
3	4.46	0.87	2.02	areia	43.9	107.1	0.283	0.569	88.8	0.514	Liquefaz / Liquefaz
4	**4.96**	**0.93**	**2.03**	**areia**	**52.1**	**110.0**	**0.313**	**0.523**	**91.7**	**0.486**	**Liquefaz / Liquefaz**
5	5.12	0.95	2.05	areia	60.3	109.7	0.332	0.483	90.2	0.445	Liquefaz / Liquefaz
6	5.57	0.84	2.02	areia	68.6	107.2	0.346	0.445	88.4	0.415	Liquefaz / Liquefaz
7	1.92	2.43	2.66	mistura de silte	76.4	–	–	–	–	–	*semelhante à argila*
8	2.03	2.40	2.68	mistura de silte	84.3	–	–	–	–	–	*semelhante à argila*
9	2.03	2.55	2.73	mistura de silte	92.3	–	–	–	–	–	*semelhante à argila*
10	17.69	1.00	1.74	areia	102.5	173.9	0.364	1.579	184.9	1.808	Seguro / Seguro
11	20.25	1.03	1.72	areia	112.8	192.7	0.361	3.455	199.1	2.187	Seguro / Seguro
12	20.21	0.88	1.69	areia	123.3	186.2	0.357	2.527	186.1	1.821	Seguro / Seguro
13	19.88	0.95	1.73	areia	133.8	177.5	0.353	1.758	180.8	1.689	Seguro / Seguro
14	1.17	3.85	3.28	argila	142.9	–	–	–	–	–	*semelhante à argila*
15	1.21	3.91	3.30	argila	150.6	–	–	–	–	–	*semelhante à argila*
16	1.22	3.91	3.33	argila	158.3	–	–	–	–	–	*semelhante à argila*
17	24.54	0.77	1.63	areia	167.3	206.1	0.341	6.842	188.5	1.951	Seguro / Seguro
18	26.33	0.71	1.60	areia	177.7	218.9	0.335	9.233	196.2	2.212	Seguro / Seguro
19	26.27	0.79	1.64	areia	188.3	213.7	0.330	9.199	189.9	2.069	Seguro / Seguro
20	25.71	0.76	1.65	areia	198.9	203.9	0.324	5.959	181.1	1.868	Seguro / Seguro

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

1 Da leitura à zona: cada leitura representa até os pontos médios vizinhos (no máximo 0.25 m); resultados idênticos são combinados

Método	Zona liquefazível (m)	Espessura (m)	Limítrofe (m)	FS mínimo	z (m)
Boulanger–Idriss	1.83 – 6.03	**4.20**	0.00	0.445	6.00
Robertson–Wride	1.83 – 6.03	**4.20**	0.00	0.415	6.00

Ambos os métodos consideram liquefazível, no CPT-1, o intervalo de **1.83 – 6.03 m** (4.20 m); o menor FS ocorre em 6.0 m em ambos. A linha de 4.0 m é o Exemplo 1, resolvido manualmente. A camada de comportamento siltoso entre 6 – 9 m ($I_c > 2.6$) é considerada de comportamento argiloso e excluída nas linhas de 7 – 9 m.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Sondagens	**CPT-1 (nível do lençol freático a 1.80 m), CPT-2 (2.40 m), CPT-3 (3.10 m); mesmos parâmetros**
Comparação	**cada método com seu próprio pacote**

PEDE-SE

FS mínimo de cada sondagem, espessuras **liquefeitas** e **limítrofes**.

Solução

SOLUÇÃO

Sondagem	NA (m)	Método	FS mínimo	z (m)	Zonas liquefeitas (m)	Espessura (m)	Limítrofe (m)
CPT-1	1.80	Boulanger–Idriss	**0.445**	6.00	1.83 – 6.03	4.20	0.00
		Robertson–Wride	**0.415**	6.00	1.83 – 6.03	4.20	0.00
CPT-2	2.40	Boulanger–Idriss	**0.605**	7.10	2.62 – 7.53	4.90	0.85
		Robertson–Wride	**0.640**	7.10	2.67 – 7.53	4.85	0.25
CPT-3	3.10	Boulanger–Idriss	**0.655**	8.50	5.03 – 10.03	5.00	0.00
		Robertson–Wride	**0.683**	8.50	5.03 – 10.03	5.00	0.00

Em cada sondagem, ambos os métodos desencadeiam a liquefação; as espessuras liquefeitas são quase idênticas (4.2 – 5.0 m). As diferenças estão nas espessuras marginais (CPT-2: 0.85 / 0.25 m) e no menor FS. O menor FS é **sensível ao ruído**; a espessura é o valor mais estável.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

EXEMPLO

Dados

Caso-base	**CPT-1:** $a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$, $I_{c,lim} = 2.6$, $C_{FC} = 0$, **nível do lençol freático de projeto = nível do lençol freático do ensaio** (1.80 **m**)
Variáveis	**apenas um de cada vez:** $I_{c,lim}$ **2.4 / 2.8;** C_{FC} ∓ 0.29**;** a_{max} **0.25g / 0.45g; nível do lençol freático de projeto 1.0 m**

PEDE-SE

O **menor FS** e a **espessura liquefeita** da CPT-1 (dois métodos); verificação à mão de FC para C_{FC}.

Solução (1/2)

SOLUÇÃO

Situação	Variação	FS_{min} (BI)	z (m)	Espessura (m)	FS_{min} (RW)	z (m)	Espessura (m)
Base	–	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ diminui	2.4	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ aumenta	2.8	0.318	8.80	**7.20**	0.391	8.45	**7.20**
C_{FC}	−0.29	0.318	6.00	**4.20**	–	–	–
C_{FC}	+0.29	0.579	6.00	**4.20**	–	–	–
a_{max} diminui	0.25g	0.624	6.00	**4.20**	0.582	6.00	**4.20**
a_{max} aumenta	0.45g	0.346	6.00	**4.20**	0.323	6.00	**4.20**
O nível do lençol freático de projeto sobe	1.0 m	0.400	6.00	**4.50**	0.368	6.00	**4.50**

$I_{c,lim}$ = 2.8 é o dado de entrada mais influente: a areia siltosa entre 6 e 9 m (I_c 2.6 – 2.8) passa a ser considerada, a espessura liquefazível varia: 4.2 → **7.2 m**, e $FS_{min} \approx 0.32$. C_{FC} existe apenas em B&I e faz FS variar entre 0.32 e 0.58; a_{max} e o nível do lençol freático de projeto pouco alteram a espessura.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

1 Efeito de C_{FC} sobre o teor de finos na leitura de exemplo (I_c = 2.031)

$$C_{FC} = -0.29: \;\; FC = 80(2.0312 - 0.29) - 137 = \mathbf{2.30\ \%}$$

$$C_{FC} = 0: \;\; FC = 80(2.0312) - 137 = \mathbf{25.50\ \%}$$

$$C_{FC} = +0.29: \;\; FC = 80(2.0312 + 0.29) - 137 = \mathbf{48.70\ \%}$$

FC 2.3 → 25.5 → 48.7 % (a incerteza em I_c altera muito o FC): a correção de finos Δq_{c1N} é, por isso, incerta, e um **C_{FC} específico do local** requer teores de finos de laboratório ao lado da sondagem.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Resumo

Pontos-chave

Registro do cone → $q_t = q_c + (1 - a)u_2$, R_f, γ (a partir do CPT), σ'_v, $\mathbf{I_c}$ (iteração em n); $I_c > 2.6$ semelhante a argila, descartado

Dois conjuntos: Boulanger–Idriss ($FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137$, q_{c1Ncs}, CRR, MSF, K_σ) e Robertson–Wride (K_c multiplica, CRR cúbico); seus componentes não são misturados

Exemplo (4.00 m): σ'_v 52.05 kPa, I_c 2.031; B&I q_{c1Ncs} 109.99, CRR 0.1636, CSR 0.3127 → **FS 0.523**; R&W $(q_{c1N})cs$ 91.73, $CRR_{7.5}$ 0.1518, CSR 0.3120 → **FS 0.486**

Zona: estende-se até os pontos médios vizinhos (≤ 0.25 m); os trechos abaixo de $h_{min} = 0.10$ m são unidos; CPT-1 liquefazível de 1.83 – 6.03 m (4.20 m)

Sensibilidade: $I_{c,lim}$ e C_{FC} são influentes; o menor FS é sensível a ruído, e a espessura é mais estável; os resultados dizem respeito apenas ao desencadeamento, e as consequências (recalque, espalhamento lateral) exigem cálculo à parte

Referências bibliográficas

Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Report UCD/CGM-14/01, University of California, Davis.

Robertson, P.K., Wride, C.E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 35(3), 442–459.

Youd, T.L., Idriss, I.M. et al. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 127(10), 817–833.

Robertson, P.K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 27(1), 151–158.

Robertson, P.K., Cabal, K.L. (2010). Estimating soil unit weight from CPT. Proc. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach.

Idriss, I.M. (1999). An update to the Seed–Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential. Proc. TRB Workshop, FHWA-RD-99-165.

Liao, S.S.C., Whitman, R.V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. J. Geotech. Eng., ASCE, 112(3).

Hynes, M.E., Olsen, R.S. (1999). Influence of confining stress on liquefaction resistance. Proc. International Workshop on the Physics and Mechanics of Soil Liquefaction, Balkema.

Idriss, I.M., Boulanger, R.W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. EERI Monograph MNO-12.

NOTA

Todos os exemplos numéricos foram gerados com o mecanismo de cálculo do próprio módulo; o módulo fornece os mesmos valores. O projeto inicial do módulo consiste nestas três sondagens (a_{max} = 0.35g, M = 7.5).

GeoTerva

Cálculos geotécnicos on-line

Da teoria à prática

Colar as próprias sondagens de cone (q_c, f_s, u_2) ou lê-las de um arquivo; informar o nível do lençol freático e os parâmetros sísmicos. Para cada leitura, o módulo fornece I_c, CSR, CRR, FS, as zonas, a espessura liquefazível, os resultados dos dois métodos, o corte com faixas de cor, a solução etapa por etapa e o relatório.

Abrir o módulo → **Página de teoria →**

Abrir no celular
Os módulos de teste não exigem cadastro.