Presentación de clase de geotecnia · Licuefacción

Desencadenamiento de la licuefacción con CPT

Clase: desencadenamiento de la licuefacción a partir del CPT; una lectura del cono se resuelve a mano de principio a fin con dos métodos (Boulanger–Idriss, Robertson–Wride) y el resto de las lecturas, con tablas.

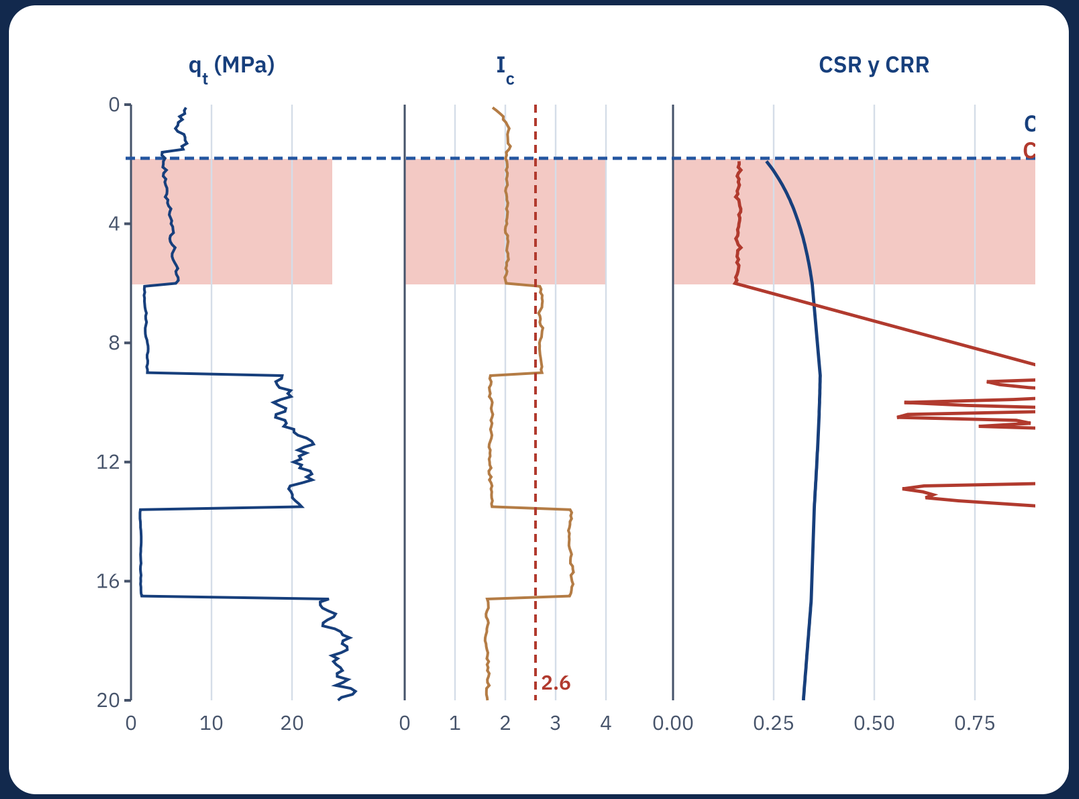
Datos del cono · Ic

Dos métodos

CSR · CRR · FS

Zonas

Resoluble a mano



Se basa en la página de teoría de GeoTerva · geoterva.com

¿Qué aprenderemos en esta clase?

Obtención de la **resistencia de punta corregida del cono q_t**, de la **relación de fricción R_f** y del **índice de tipo de comportamiento del suelo I_c** a partir del registro del cono (q_c, f_s, u_2)

Estimar a partir de los datos del cono el tipo de suelo, el peso específico y el contenido de finos (no se introduce tabla de estratos)

Dos procedimientos completos: Boulanger–Idriss (2014) y Robertson–Wride (1998, NCEER); en cada uno son coherentes entre sí la normalización, la curva CRR, el MSF y K_σ

CSR, **FS = CRR/CSR**, lecturas descartadas, **zonas** y espesor licuable

Una sola lectura (4.00 m) de un sondeo, resuelta a mano con dos métodos; las demás lecturas, con los mismos pasos, en la tabla

DESARROLLO DE LA CLASE

Cada tema se desarrolla en **tres pasos**:

1 · **Teoría**: fórmula y su justificación

2 · **Enunciado**: datos y se pide

3 · **Solución**: paso a paso, con números

Ejemplo: CPT-1 (nivel freático a 1.80 m; profundidad de 20 m, intervalo de 5 cm); a_{max} = 0.35 g, M = 7.5, relación de área neta a = 0.80, FS_{nec} = 1.20.

q_t, R_f y unidades

TEORÍA

Dado que el **cono** proporciona un registro casi continuo (intervalo de lectura de 1–5 cm), no existe una tabla de estratos que introducir.

El tipo de suelo, el peso específico y el contenido de finos se estiman **a partir de los datos del cono**.

Las **consecuencias de la licuefacción** — asentamiento, propagación lateral, pérdida de capacidad portante — quedan fuera del alcance de esta versión.

La resistencia de punta corregida del cono se calcula con la expresión $q_t = q_c + (1 - a) \cdot u_2$, donde a es la relación de áreas netas del cono (0.65–0.85; valor habitual 0.80).

En arcillas blandas y limos donde el valor de u_2 es muy superior al hidrostático, la corrección es importante, mientras que en arenas es pequeña; si no se ha registrado u_2, se toma $q_t = q_c$.

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

γ a partir del CPT; dos profundidades del nivel freático

TEORÍA

El peso específico se estima en cada lectura a partir de los datos del CPT; **R_f** está en % y su valor se mantiene entre 1.5 γ_w y 2.5 γ_w.

El peso específico se integra desde la superficie; como alternativa, se emplean dos valores constantes: γ por encima del nivel freático y γ_{sat} por debajo.

La presión intersticial se supone hidrostática a partir del nivel freático; para **C_N** e **I_c** se emplea el nivel freático durante el ensayo, y para CSR y K_σ, el nivel freático de cálculo.

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

I_c y exponente n

TEORÍA

El índice de tipo de comportamiento del suelo se calcula con la expresión I_c = [(3.47 – log Q)² + (log F + 1.22)²]^0.5.

El exponente n toma el valor 0.5 en arenas y 1.0 en arcillas, y se determina mediante la iteración de Robertson & Wride (1998).

El registro estratigráfico de los dibujos se basa en esta clasificación; una secuencia de espesor inferior a h_{min} se une a su vecina más larga.

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

Intervalo de I_c	< 1.31	1.31 – 2.05	2.05 – 2.60	2.60 – 2.95	2.95 – 3.60	> 3.60
Suelo (Robertson 1990)	arena con grava – densa	arena: limpia – limosa	mezcla de arena	mezcla de limo	arcilla	orgánico

¿Qué lectura se evalúa?

TEORÍA

Una lectura se evalúa cuando se encuentra por debajo del nivel freático de diseño, a una profundidad no mayor que z_{max}, y en un suelo que se comporta como arena.

Los suelos con un valor de I_c superior a $I_{c,lim}$ (valor predeterminado 2.6) se consideran de tipo arcilloso; estos suelos se remiten a la comprobación de ablandamiento cíclico.

La frontera entre el comportamiento de tipo arena y el de tipo arcilla no es nítida; se recomienda repetir el análisis con $I_{c,lim}$ = 2.4, 2.6 y 2.8.

En una lectura en la que la resistencia de punta neta $q_t - \sigma_v$ no es positiva, no puede definirse el índice de comportamiento del suelo y la lectura no se evalúa; las lecturas eliminadas permanecen en todas las tablas junto con sus motivos.

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

TEORÍA

Como en la normalización de Boulanger & Idriss (2014) el exponente depende del resultado, C_N se obtiene por iteración y, en la relación de m, el valor de q_{c1Ncs} se mantiene entre 21 y 254.

En la relación FC = 80(I_c + C_{FC}) − 137, C_{FC} es el parámetro de ajuste de la correlación entre I_c y el contenido de finos; 0 corresponde a la correlación general, y ±0.29 es una desviación típica de esta correlación.

Dado que la dispersión de la correlación es grande, resulta más adecuado un valor de C_{FC} propio del emplazamiento, determinado a partir del contenido de finos obtenido en laboratorio en muestras de los sondeos próximos a los puntos CPT, que debe determinarse por separado para cada unidad 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 y K_σ

TEORÍA

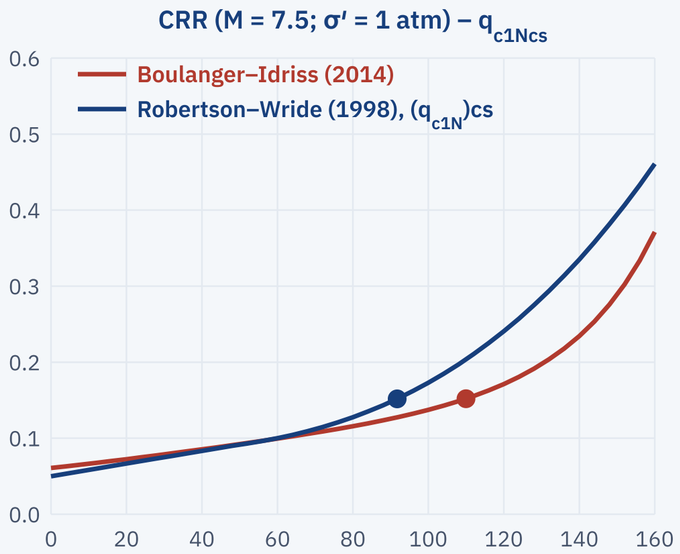
La curva de resistencia de Boulanger & Idriss (2014) es la curva determinista que figura en el informe y se basa en el percentil 16 de los datos de casos (constante 2.80).

La curva CRR(M=7.5; σ′=1) se obtiene a partir del valor de q_{c1Ncs}; cuando q_{c1Ncs} supera 211 se toma el valor 211, porque se alcanza el límite de C_σ.

σ'_V en la relación de K_σ es la tensión efectiva correspondiente al nivel freático de diseño.

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

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



Kc, CRR y MSF

TEORÍA

La resistencia de cono corregida se calcula mediante la relación $(q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N}$; K_c depende de Ic y toma el valor 1 para Ic ≤ 1.64.

En arena limpia con 1.64 < Ic < 2.36 y relación de fricción inferior al 0.5 %, se toma $K_c = 1$ y no se aplica corrección por finos.

La curva de arena limpia termina en $(q_{c1N})_{cs} = 160$; el módulo prolonga la misma relación cúbica hasta 250 ($CRR_{7.5} = 1.5$) y señala la lectura.

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

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

CSR y relación r_d de los dos métodos

TEORÍA

La relación de tensiones cíclicas se expresa como CSR = 0.65 (σ_v/σ'_v) a_{max} r_d, donde σ_v y σ'_v son las tensiones calculadas con respecto al nivel freático de cálculo.

Para el coeficiente de reducción de tensiones r_d, en el método B&I; se emplea la expresión de Idriss y en el método R&W; la de Liao–Whitman; las correcciones por magnitud y por presión de sobrecarga del terreno se aplican a la resistencia, no a la solicitación.

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

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

TEORÍA

Cada lectura representa la mitad de la distancia a la lectura superior y a la inferior; esta distancia representativa no supera 0.25 m en ninguna de las dos direcciones o, si resulta mayor, los 3/4 del intervalo de lectura habitual.

Un hueco en el registro no se extrapola a los resultados; queda como una serie no evaluada, marcada como «sin lectura», y se enumera en una advertencia.

Las lecturas consecutivas con el mismo resultado forman una serie; una serie de un solo resultado más delgada que h_{min} (valor predeterminado 0.10 m) adopta el resultado de su vecina más larga, y las series vecinas con el mismo resultado forman zonas.

Cada método forma un todo; el coeficiente de reducción de tensiones, la normalización, la corrección por arena limpia, los coeficientes de magnitud y de presión de sobrecarga del terreno y la curva de resistencia se han obtenido conjuntamente a partir de una base de datos de casos.

Las fuentes de los dos métodos prescriben no mezclar los componentes de un método con los del otro; en el módulo, la selección del método modifica conjuntamente todos estos componentes.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \qquad \text{FS} < 1 : \text{ se licúa} \qquad 1 \leq FS < FS_{req}\,(1.20) : \text{ en el límite}$$

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Lectura	$q_c = 4.956$ **MPa,** $f_s = 46.2$ **kPa,** $u_2 = 21.6$ **kPa; relación de áreas neta** $a = 0.80$
Campo	**nivel freático** $z_w = 1.80$ **m (el de cálculo es el mismo); peso específico a partir del CPT (80 lecturas de 0 a 4 m)**
Sismo	$a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$; $C_{FC} = 0$; **Robertson–Wride** $f = 0.7$; $FS_{req} = 1.20$

SE PIDE

$\mathbf{q_t}$, $\mathbf{\sigma'_v}$, $\mathbf{I_c}$; con Boulanger–Idriss y Robertson–Wride, $\mathbf{q_{c1Ncs}}$, **CRR, CSR, FS.**

Solución (1/8)

SOLUCIÓN

1 Resistencia de punta corregida y relación de fricción

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

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

2 Peso unitario (Robertson–Cabal)

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

3 Tensiones

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

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

Tensión vertical efectiva **σ′ᵥ = 52.05 kPa**.

Solución (2/8)

SOLUCIÓN

4 Resistencia neta por punta y F

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

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

5 Iteración del exponente n (Robertson–Wride): primero n = 1.0 (tanteo para arcilla)

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

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log 93.88)^2 + (\log 0.9454 + 1.22)^2} = \mathbf{1.9162} \leq 2.6 \ \Rightarrow\ \text{no es arcilla}$$

Solución (3/8)

SOLUCIÓN

6 Se prueba n = 0.5 (arena)

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

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

I_c = 2.031 ≤ 2.6: no es de tipo arcilloso, se evalúa la lectura.

Solución (4/8)

SOLUCIÓN

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

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

8 m y C_N están acoplados: iteración con q_{c1Ncs} ($x = q_t/P_a = 48.955$, $\sigma'_v = 52.05$)

Iteración	q_{c1Ncs} (entrada)	m	C_N	$q_{c1N} = C_N q_t/P_a$	Δq_{c1N}	q_{c1Ncs} (salida)
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 en 13 iteraciones: **m = 0.4768, C_N = 1.3738, q_{c1N} = 67.252, Δq_{c1N} = 42.736 → q_{c1Ncs} = 109.988**.

Solución (5/8)

SOLUCIÓN

9 Resistencia de referencia (M = 7.5; 1 atm), MSF y 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**.

Solución (6/8)

SOLUCIÓN

10 Solicitación (r_d de Idriss) y factor de seguridad

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

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

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

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

Boulanger–Idriss: **FS = 0.523 < 1**, se desencadena la licuefacción.

Solución (7/8)

SOLUCIÓN

11 C_Q y q_{c1N} (n = 0.5, igual)

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

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

12 K_c (I_c = 2.031: 1.64 < I_c < 2.36 pero F = 0.945 % ≥ 0.5: HAY corrección por finos)

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

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

En Robertson–Wride, el efecto de los finos es el **multiplicador K_c** (1.343); en Boulanger–Idriss se **suma** Δq_{c1N} (+42.7); $(q_{c1N})cs$ = 91.73, q_{c1Ncs} = 109.99.

Solución (8/8)

SOLUCIÓN

13 Resistencia, solicitación (Liao–Whitman r_d; $K_\sigma = 1$ porque $\sigma'_v < P_a$) y FS

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

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

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

Ambos paquetes llegan al mismo resultado: **Boulanger–Idriss FS = 0.523**, **Robertson–Wride FS = 0.486**; ambos < 1. La diferencia entre ellos procede de la corrección por finos y de r_d.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Sondeo	**CPT-1: 20 m, 400 lecturas cada 5 cm; NF** 1.80 **m**
Métodos	**Boulanger–Idriss y Robertson–Wride; cada lectura se resuelve con los pasos del Ejemplo 1**

SE PIDE

Para la lectura de cada metro: **q_t, R_f, I_c, suelo, σ'_v, q_{c1Ncs}, CSR, CRR, FS** (dos métodos) y la decisión.

Solución (1/2)

SOLUCIÓN

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

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

1 De la lectura a la zona: cada lectura representa hasta los puntos medios con las lecturas vecinas (como máximo 0.25 m); los resultados idénticos se agrupan

Método	Zona licuable (m)	Espesor (m)	En el límite (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 métodos consideran licuable el intervalo **1.83 – 6.03 m** (4.20 m) en CPT-1; el menor FS se da en ambos a 6.0 m. La fila de 4.0 m es el Ejemplo 1, resuelto a mano. El estrato de tipo limoso entre 6 – 9 m ($I_c > 2.6$) se considera de tipo arcilloso y se descarta en las filas de 7 – 9 m.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Sondeos	**CPT-1 (nivel freático a 1.80 m), CPT-2 (2.40 m), CPT-3 (3.10 m); mismos parámetros**
Comparación	**cada método con su propio paquete**

SE PIDE

El **FS mínimo** de cada sondeo y los espesores **licuables** y **en el límite**.

Solución

SOLUCIÓN

Sondeo	NF (m)	Método	FS mínimo	z (m)	Zonas que licúan (m)	Espesor (m)	En el límite (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

En cada sondeo ambos métodos desencadenan la licuefacción; los espesores licuefactables son casi idénticos (4.2 – 5.0 m). Las diferencias están en los espesores marginales (CPT-2: 0.85 / 0.25 m) y en el FS mínimo. El FS mínimo es **sensible al ruido**; el espesor es el valor más estable.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Enunciado

EJEMPLO

Datos

Caso base	**CPT-1:** $a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$, $I_{c,lim} = 2.6$, $C_{FC} = 0$, **nivel freático de cálculo = nivel freático del ensayo (**1.80 **m)**
Variables	**solo uno cada vez:** $I_{c,lim}$ **2.4 / 2.8;** C_{FC} ∓ 0.29**;** a_{max} **0.25g / 0.45g; nivel freático de diseño 1.0 m**

SE PIDE

Para CPT-1, el **FS mínimo** y el **espesor licuable** (dos métodos); comprobación a mano de FC para C_{FC}.

Solución (1/2)

SOLUCIÓN

Situación	Variación	FS_{min} (BI)	z (m)	Espesor (m)	FS_{min} (RW)	z (m)	Espesor (m)
Base	–	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ disminuye	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} disminuye	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**
Asciende el nivel freático de cálculo	1.0 m	0.400	6.00	**4.50**	0.368	6.00	**4.50**

$I_{c,lim}$ = 2.8 es el dato de entrada más influyente: la arena limosa entre 6 y 9 m (I_c 2.6 – 2.8) pasa a computarse, el espesor licuable pasa de 4.2 → **7.2 m** y FS_{min} ≈ 0.32. C_{FC} solo existe en B&I y hace variar FS entre 0.32 y 0.58; a_{max} y el nivel freático de proyecto no modifican mucho el espesor.

Solución (2/2)

SOLUCIÓN

1 Efecto de C_{FC} sobre el contenido de finos en la lectura del ejemplo (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 % (la incertidumbre en I_c modifica mucho FC): por ello la corrección por finos Δq_{c1N} es incierta, y un **C_{FC} específico del emplazamiento** exige contenidos de finos de laboratorio junto al sondeo.

Comprobar la solución en GeoTerva ↗

Resumen

Puntos clave

Registro del cono → $q_t = q_c + (1 - a)u_2$, R_f, γ (a partir del CPT), σ'_v, $\mathbf{I_c}$ (iteración de n); $I_c > 2.6$ de tipo arcilloso, se excluye

Dos procedimientos: Boulanger–Idriss ($FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137$, q_{c1Ncs}, CRR, MSF, K_σ) y Robertson–Wride (K_c multiplica, CRR cúbico); sus componentes no se mezclan

Ejemplo (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: se extiende hasta los puntos medios vecinos (≤ 0.25 m); lo inferior a $h_{min} = 0.10$ m se fusiona; CPT-1 licuable 1.83 – 6.03 m (4.20 m)

Sensibilidad: influyen $I_{c,lim}$ y C_{FC}; el FS mínimo es sensible al ruido, el espesor es más estable; los resultados son solo de desencadenamiento, y sus consecuencias (asentamiento, extensión lateral) requieren un cálculo aparte

Referencias 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 los ejemplos numéricos se han obtenido con el propio motor de cálculo del módulo; el módulo da los mismos valores. El proyecto inicial del módulo son estos tres sondeos (a_{max} = 0.35g, M = 7.5).

GeoTerva

Cálculos geotécnicos en línea

De la teoría a la práctica

Pegar los propios sondeos con cono (q_c, f_s, u_2) o leerlos de un archivo; introducir el nivel freático y los parámetros sísmicos. Para cada lectura, el módulo proporciona I_c, CSR, CRR y FS, las zonas, el espesor licuable, los resultados de los dos métodos, la sección con bandas de color, la solución paso a paso y el informe.

Abrir el módulo → **Página de teoría →**

Abrir en el teléfono
Los módulos de prueba no requieren registro.

Si desea utilizarlas en sus clases: info@geoterva.com