

JORNADA TECNOLÓGICA 2011

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN DE UN SUELO BAJO FUERZAS SISMICAS Y DE OLEAJE

ING. JOSÉ HARRIS, M.I.

A graphic of a water splash on a blue background, with the main splash on the left and several smaller droplets trailing to the right.

Licuación de un suelo

- Concepto introducido por Casagrande (1930's)
- Durante un sismo, la aplicación de esfuerzos cortantes cíclicos inducidos por la propagación de ondas de corte causa que la arena suelta se contraiga, produciendo un incremento en la presión de poros.



Licuación de un suelo

- Debido a que el movimiento sísmico ocurre rápidamente, el suelo no cohesivo es sometido a condiciones de cargas no drenadas (análisis de esfuerzo efectivo).
- El incremento en la presión de poros produce un flujo ascendente del agua hacia la superficie, en donde emerge en forma de volcán de lodo o arena hirviente.



A close-up photograph of a water splash on a blue background, with several droplets and a large central splash.

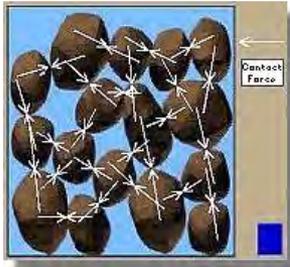
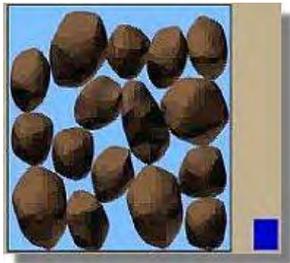
Licuación de un suelo

- El desarrollo de altas presiones de poro debido al movimiento (vibración) del terreno y el flujo ascendente del agua pueden llevar al estrato de arena a una condición líquida la cual se denomina licuación.
- En este estado, el esfuerzo efectivo es cero, y las partículas individuales de suelo son liberadas de cualquier presión de confinamiento, de manera que estas flotan en el agua (Ishihara 1985).

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi = (\sigma_t - u) \tan \phi = 0$$

$$r_u = \frac{u}{\sigma_{v0}} = 1$$

Licuación de un suelo



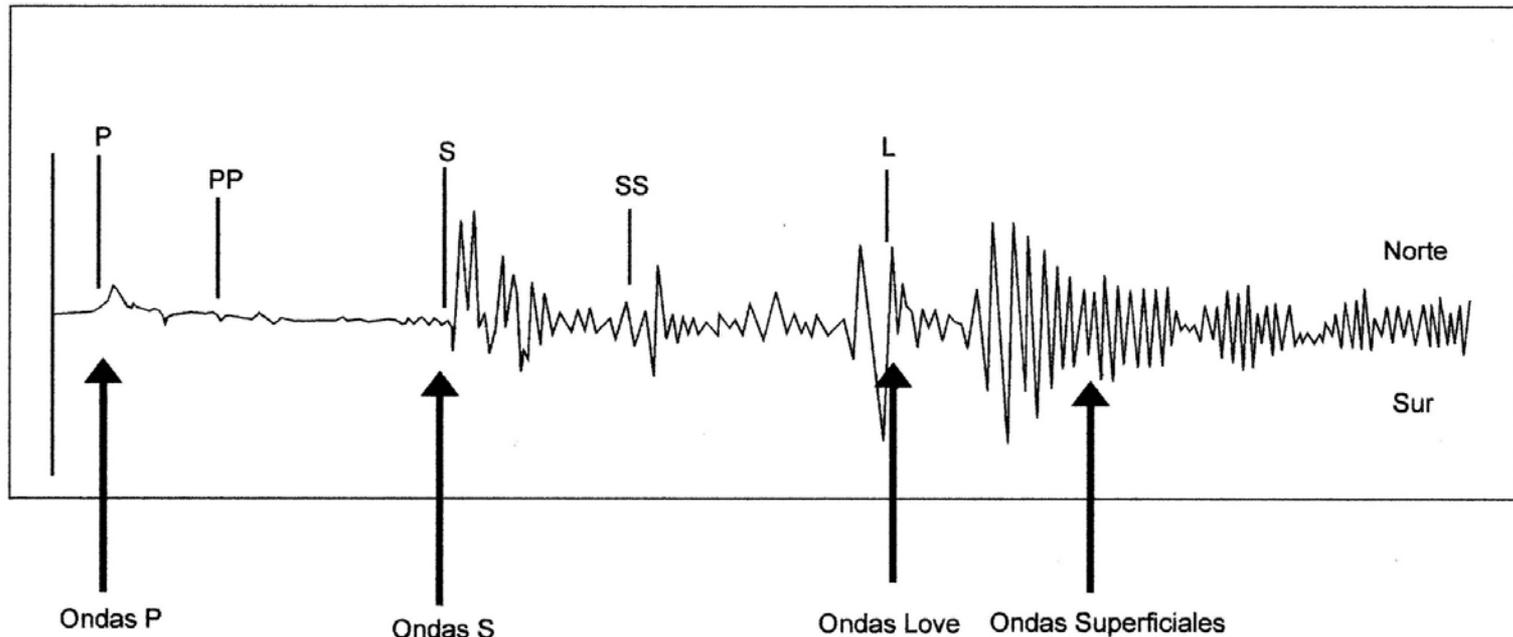
- Arena suelta, saturada
- El peso de las partículas produce las fuerzas de contacto
- Estas fuerzas mantienen en su lugar a las partículas y le dan su resistencia al suelo
- Carga aplicada rápidamente, se rompe la estructura
- Partículas intentan formar una agrupación más densa
- No hay tiempo suficiente para que el agua en los poros pueda ser expulsada
- El agua atrapada evita que las partículas se acerquen y aumenta la presión de poro
- Se reducen las fuerzas de contacto y pierde resistencia el suelo.



Licuación de un suelo

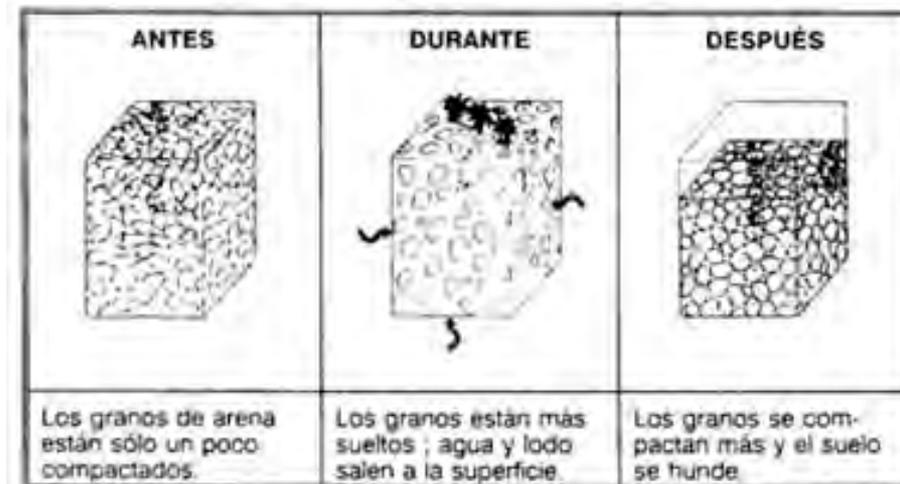
- Después que el suelo ha licuado, el exceso de presión de poros comenzará a disiparse. El tiempo que dicho suelo permanecerá en estado líquido depende de dos factores:

1) la duración del movimiento sísmico (vibración)



Licuación de un suelo

- una aplicación más larga y más intensa de esfuerzos cortantes cíclicos hace que persista por más tiempo el estado de licuación del suelo.
- 2) Las condiciones de drenaje del suelo. Similarmente , si el suelo licuable está confinado por un estrato superior e inferior de arcilla, entonces tomará, más tiempo la disipación del exceso de las presiones de poro.
- Una vez que el proceso de licuación esta completo, el suelo será más denso.



Licuación de un suelo

- La licuación puede producir asentamientos superficiales o una falla en la capacidad portante de las cimentaciones de una estructura.
- Asimismo, puede contribuir al movimiento lateral de los taludes de un relleno.



Licuación de un suelo



“Las estructuras en la superficie de un depósito de arena suelta que ha licuado durante un sismo se inclinarán o caerán, los tanques soterrados flotarán a la superficie”..(Seed 1970).

A close-up photograph of a water droplet splashing, creating a crown-like shape with several smaller droplets flying off. The background is a deep blue gradient.

Factores que gobiernan la licuación

- **MAGNITUD Y DURACIÓN DEL MOVIMIENTO:** La aceleración y duración del sismo determinan la magnitud de las deformaciones por corte que causan la contracción de las partículas del suelo y el desarrollo del exceso en las presiones de poro que conducen a una licuación.
- El potencial de licuación se incrementa a medida que se incrementa la intensidad y duración de un sismo. Sismos con una alta magnitud producirán una mayor aceleración del terreno así como una larga duración del movimiento sísmico.



Factores que gobiernan la licuación

- **MAGNITUD Y DURACIÓN DEL MOVIMIENTO:** Aunque los datos están un poco dispersos, se ha concluido que valores de a_{\max} cercanos a $0.10g$ y una magnitud local M_L de 5.0 justifican la realización de un análisis del potencial de licuación de un terreno (Ishihara 1985).
- Además de los sismos, otras condiciones, tales como las voladuras, hincado de pilotes y vibraciones debidas al tránsito pueden ocasionar la licuación.





Factores que gobiernan la licuación

- MAGNITUD Y DURACIÓN DEL MOVIMIENTO:**

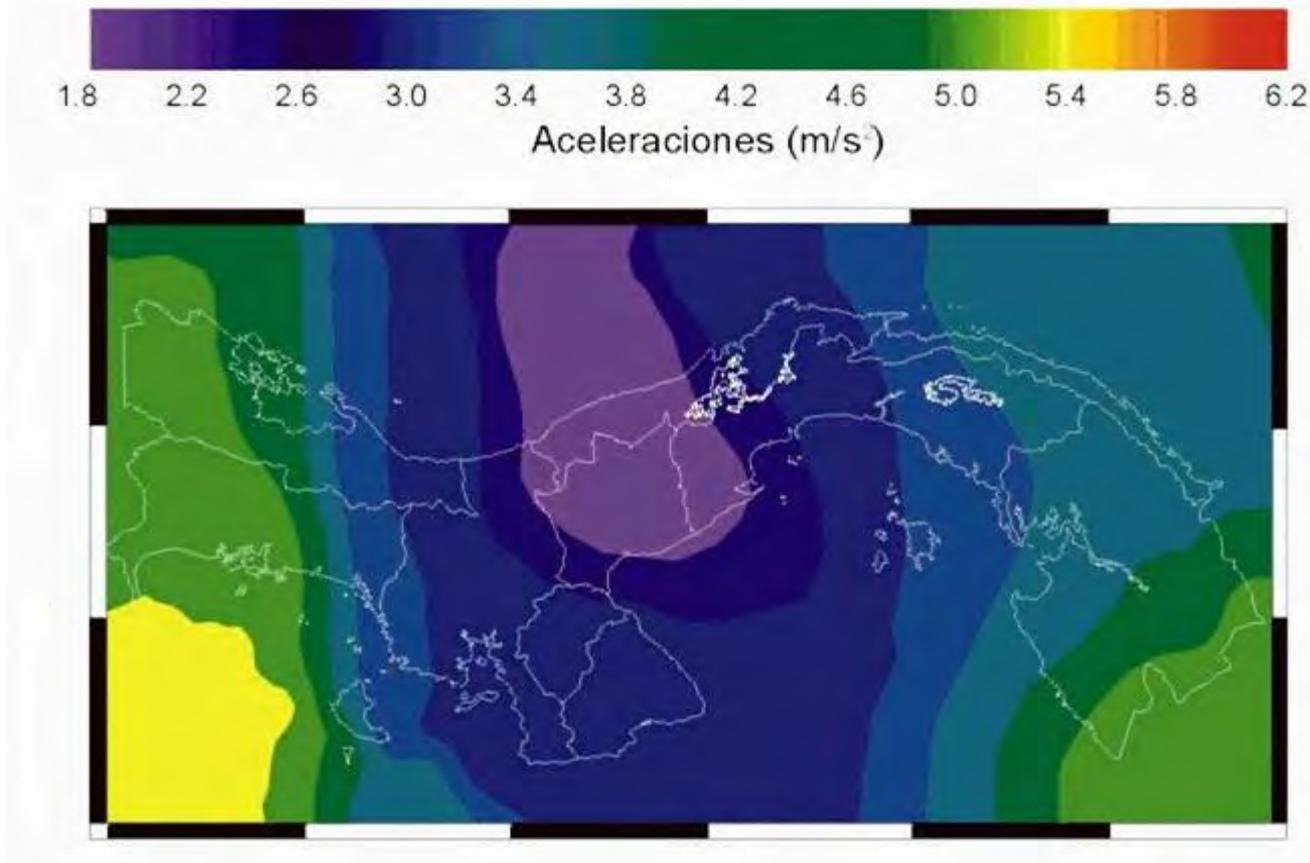
TABLE 2.2 Approximate Correlations between Local Magnitude M_L and Peak Ground Acceleration a_{max} , Duration of Shaking, and Modified Mercalli Level of Damage near Vicinity of Fault Rupture

Local magnitude M_L	Typical peak ground acceleration a_{max} near the vicinity of the fault rupture	Typical duration of ground shaking near the vicinity of the fault rupture	Modified Mercalli intensity level near the vicinity of the fault rupture
≤ 2	—	—	I–II
3	—	—	III
4	—	—	IV–V
5	0.09g	2 s	VI–VII
6	0.22g	12 s	VII–VIII
7	0.37g	24 s	IX–X
≥ 8	$\geq 0.50g$	≥ 34 s	XI–XII

Sources: Yeats et al. 1997, Gere and Shah 1984, and Housner 1970.

Factores que gobiernan la licuación

- **MAGNITUD Y DURACIÓN DEL MOVIMIENTO:**





Factores que gobiernan la licuación

- **NIVEL FREÁTICO:** La condición más conductiva a un estado de licuación es un NF cercano a la superficie.
- Suelos no saturados por encima del NF no licuarán. En aquellos sitios donde el NF fluctúa significativamente, el potencial de licuación también fluctuará.
- Se deberá considerar la variación histórica o estacional del NF en el análisis de licuación a menos que se recomiende la utilización de un nivel más bajo o alto como el apropiado (Division of Mine and Geology 1997).



Factores que gobiernan la licuación

- **TIPO DE SUELO:** “El riesgo asociado con la licuación de un suelo se encuentra en los depósitos de arenas finas a medias con pocos finos plásticos. Ocasionalmente, se han reportado algunos casos de suelos gravosos que aparentemente han licuado.”(Ishihara 1985).
- Seed (1983) estableció basado en ensayos de laboratorio y comportamiento en campo, la gran mayoría de los suelos cohesivos no licuan durante un sismo. El tipo más susceptible de suelos para licuar son los suelos no plásticos o no cohesivos ($IP < 20$).



Factores que gobiernan la licuación

- **TIPO DE SUELO:** Para que un suelo cohesivo licue debe satisfacer los siguientes tres criterios:
 - Porcentaje de finos $< 15\%$
 - Límite líquido, $LL < 35\%$
 - Contenido de agua $> 0.9 LL$

Si el suelo no satisface estos tres criterios, se considera que no es susceptible a la licuación. Aunque este suelo no licue, si habrá una reducción significativa de su resistencia al corte debido al movimiento sísmico (vibración).



Factores que gobiernan la licuación

- **DENSIDAD RELATIVA DEL SUELO, D_r :** Suelos no cohesivos con una densidad relativa «suelta» son susceptibles a la licuación.

TABLE 5.2 Correlation between Uncorrected SPT N Value and Density of Clean Sand

Uncorrected N value (blows per foot)	Sand density	Relative density D_r , percent
0–4	Very loose condition	0–15
4–10	Loose condition	15–35
10–30	Medium condition	35–65
30–50	Dense condition	65–85
Over 50	Very dense condition	85–100

Note: Relative density $D_r = 100(e_{\max} - e)/(e_{\max} - e_{\min})$, where e_{\max} = void ratio corresponding to the loosest possible state of the soil, usually obtained by pouring the soil into a mold of known volume (ASTM D 4254-96, 2000), e_{\min} = void ratio corresponding to the densest possible state of the soil, usually obtained by vibrating the soil particles into a dense state (ASTM D 4253-96, 2000), and e = the natural void ratio of the soil.

Sources: Terzaghi and Peck (1967) and Lambe and Whitman (1969).

Factores que gobiernan la licuación

- **DENSIDAD RELATIVA DEL SUELO, D_r :**

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100\%$$

$$D_r = \frac{\gamma_{d \max}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{d \min}}{\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min}} \times 100\%$$

e_{\max} = relación de vacíos máxima

e_{\min} = relación de vacíos mínima

e = relación de vacíos del depósito de suelo (natural)

$\gamma_{d \min}$ = peso volumétrico seco mínimo

$\gamma_{d \max}$ = peso volumétrico seco máximo

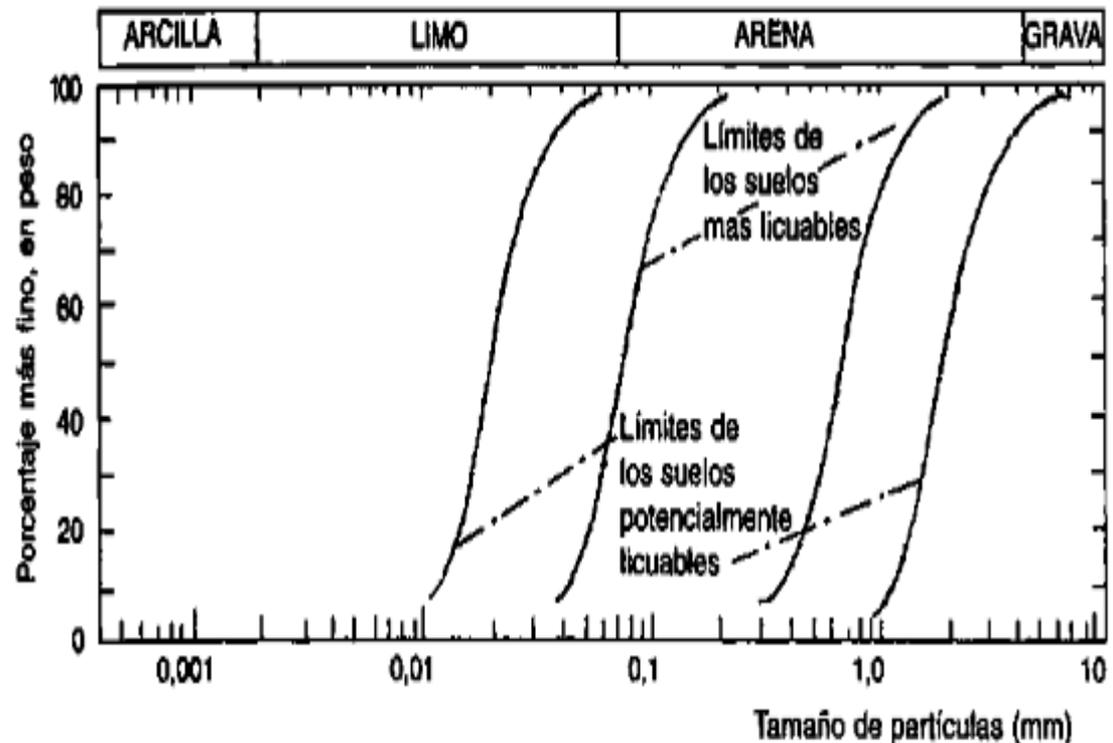
γ_d = peso volumétrico seco del depósito de suelo (natural)



Factores que gobiernan la licuación

- TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS:**

Suelos no plásticos uniformemente graduados tienden a formar arreglos de partículas inestables lo cual los hace más susceptibles a la licuación que los suelos bien graduados.



Kramer (1996) establece que la evidencia de campo indica que la mayor parte de fallas por licuación han involucrado suelos granulares uniformemente graduados.



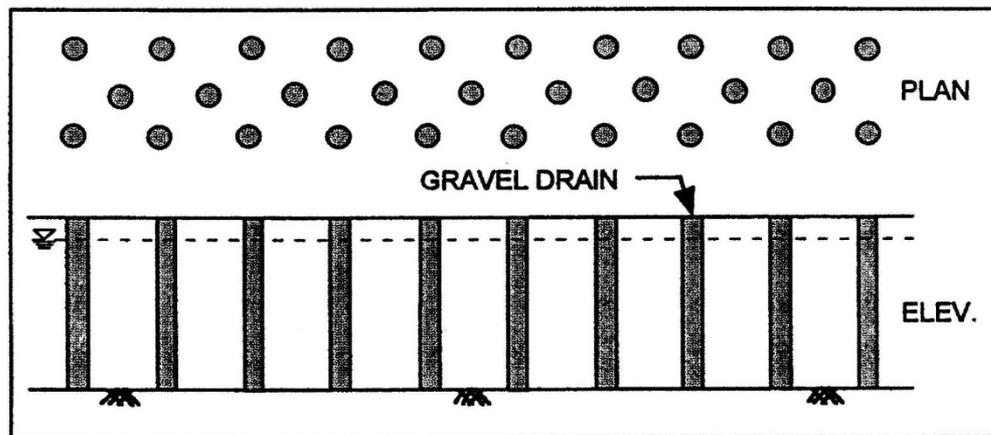
Factores que gobiernan la licuación

- **CONDICIONES DE COLOCACIÓN O DEPOSICIÓN:** Rellenos hidráulicos (rellenos colocados bajo el agua) tienden a ser más susceptibles a la licuación debido a la estructura suelta y segregada creada por las partículas de suelo que caen a través del agua.
- Los depósitos de suelos naturales formados en lagos, ríos o el océano tienden a formar una estructura de suelo suelta y segregada.
- Los suelos que son especialmente susceptibles a la licuación están formados en ambientes lacustres, aluviales y por deposiciones marinas.



Factores que gobiernan la licuación

- **CONDICIONES DE DRENAJE:** Si el exceso de la presión de poro puede disiparse rápidamente, el suelo no licuará. Siendo esto así, los drenes de grava permeables o las capas de grava pueden reducir la licuación potencial del suelo adyacente.



Arrangement of gravel drains (after Seed and Booker, 1977).



Factores que gobiernan la licuación

- **PRESIONES DE CONFINAMIENTO:** A mayor presión de confinamiento, menos susceptible es el suelo a licuar.
- Condiciones que pueden crear una alta presión de confinamiento son: un nivel freático más profundo, que el suelo se encuentre a una mayor profundidad desde la superficie del terreno, y una sobrecarga aplicada en la superficie del terreno.
- Casos de estudio han mostrado que la posible zona de licuación se extiende desde la superficie del terreno hasta una profundidad máxima de 50 ft (15 m).

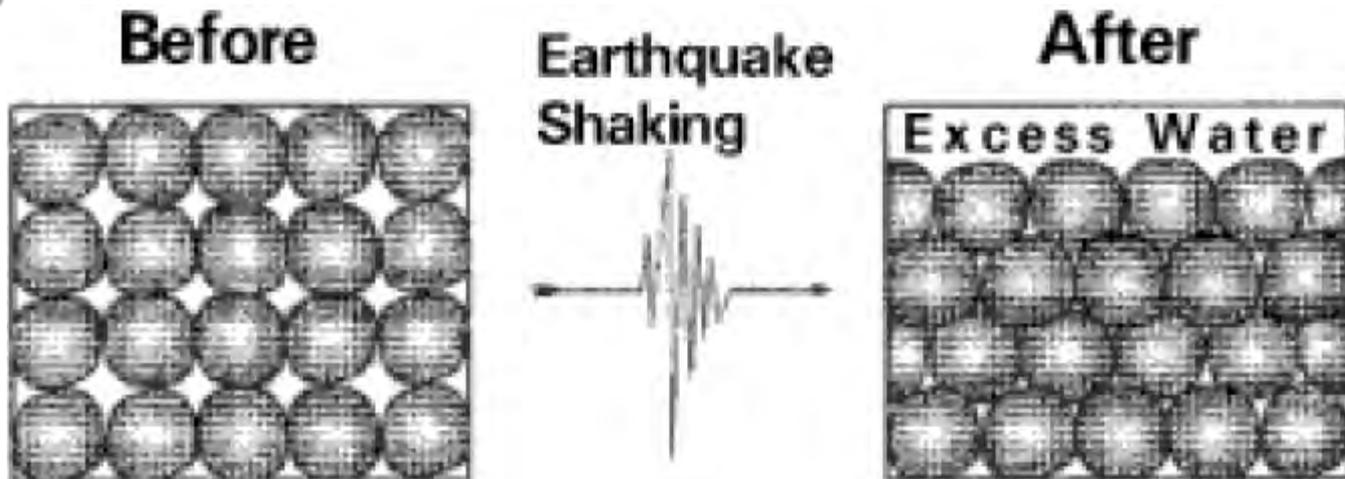
A dynamic splash of water in shades of blue, with droplets and ripples, set against a dark blue background. The splash is positioned on the left side of the slide, partially overlapping the title text.

Factores que gobiernan la licuación

- **PRESIONES DE CONFINAMIENTO:** Suelos más profundos generalmente no licuarán debido a las presiones de confinamiento mayores.
- Esto no significa que no se deben analizar los suelos que se encuentren a más de 50 ft (15 m).
- En muchos casos, es apropiado realizar el análisis de licuación para estos suelos. Considere la experiencia y el buen juicio ingenieril en la determinación de la profundidad de análisis apropiada.

Factores que gobiernan la licuación

- **FORMA DE LA PARTÍCULA:** La forma de la partícula puede influenciar el potencial de licuación.
- Por ejemplo, suelos con partículas redondeadas tienden a densificar más fácilmente que los suelos con partículas angulosas. Por lo tanto, un suelo que contenga partículas redondeadas es más susceptible a la licuación que uno que contenga partículas angulosas.





Factores que gobiernan la licuación

- **ANTIGÜEDAD Y CEMENTACIÓN:** Depósitos de suelos recientes tienden a ser más susceptibles a la licuación que los depósitos más antiguos.
- Se ha demostrado que mientras más tiempo un suelo este sujeto a una presión de confinamiento, tendrá una mayor resistencia a la licuación (Ohsaki 1969, Seed 1979^a, Yoshimi et al. 1989).
- El incremento en resistencia podría atribuirse a la deformación o compresión de las partículas de suelo hacia arreglos más estables. Con el tiempo, se puede desarrollar adherencia debido a la cementación en los contactos de las partículas.



Factores que gobiernan la licuación

- **HISTORIA AMBIENTAL:** Depósitos de suelos más antiguos que han sido sujetos a cargas sísmicas tendrán un incremento de su resistencia a la licuación en comparación con uno recientemente formado que tenga la misma densidad (Finn et al. 1970, Seed et al. 1975).
- La resistencia a la licuación también se incrementa con un aumento en la relación de sobreconsolidación (OCR).

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma'_{v0}}$$

- Por ejemplo, debido a la remoción por erosión de un estrato superior. Debido a que el suelo subyacente ha sido precargado.



Factores que gobiernan la licuación

- **CARGA DE EDIFICACIONES:** La construcción de una edificación pesada en la parte superior de un depósito de arena reduce la resistencia al corte aumentando el potencial de licuación de un suelo.
- Por ejemplo, suponga una losa de cimentación colocada en la superficie del terreno soporta una edificación pesada. El suelo subyacente estará sujeto a esfuerzos de corte causados por la carga de la edificación. Tales esfuerzos de corte inducidos hará más susceptible el suelo a la licuación.
- La razón es que sólo se requerirá un pequeño esfuerzo de corte adicional de un sismo para causar contracción y por consiguiente la licuación del suelo.



Factores que gobiernan la licuación

- En resumen, las condiciones del sitio y los tipos de suelo más susceptible a la licuación son los siguientes:
- **Condiciones del sitio:**
- Sitios cercanos al epicentro o ubicación de una falla (ruptura) ocasionada por un sismo.
- Sitios con un nivel freático cercano a la superficie del terreno.

A close-up photograph of a water droplet splashing, creating a crown-like shape with several smaller droplets flying off. The background is a deep blue color.

Factores que gobiernan la licuación

- En resumen, las condiciones del sitio y los tipos de suelo más susceptible a la licuación son los siguientes:
- **Tipos de suelos más susceptibles a la licuación para las condiciones del sitio:**
- Arenas que tengan una granulometría uniforme y partículas de suelo redondeadas, densidad suelta a muy suelta, depósito recientemente formado sin cementación entre los granos de suelo, y sin precarga o carga sísmica previa.



Potencial de licuación preliminar

- **Investigación de campo que se traduzca en el conocimiento estratigráfico del área, obteniéndose las propiedades índice del suelo, dando prioridad a los suelos arenosos, limosos y arcillo-limosos, hasta una profundidad del orden de 15 a 20 m.**
- **Hay que definir la posición del NF ya que los suelos que licúan, se presentan bajo el NF, en general.**
- **Se debe verificar el número de golpes (SPT) ya que hay evidencias que suelos con un $N \leq 10$, pueden licuar.**
- **Suelos en los cuales D_{50} , en la curva granulométrica es mayor de 0.02 mm y menor a 2 mm.**



Análisis del Potencial de Licuación

- **INTRODUCCIÓN:**
- El tipo más común de análisis para determinar el potencial de licuación es usar los resultados de la Prueba de Penetración Estándar (SPT) (Seed et al. 1985, Stark & Olson 1995).
- El análisis se basa en el método simplificado propuesto por Seed e Idriss (1971) denominado “Procedimiento Simplificado”. Este es el método más comúnmente utilizado para evaluar el potencial de licuación de un sitio.

A dynamic splash of water in shades of blue, with droplets and ripples, positioned on the left side of the slide.

Análisis del Potencial de Licuación

- **INTRODUCCIÓN:** Los pasos del procedimiento son los siguientes:
- Tipo apropiado de suelo: determinar si el suelo tiene la capacidad para licuar durante un sismo.
- Nivel freático: el suelo debe encontrarse por debajo del nivel freático.
- CSR inducido por el sismo: si el suelo de interés satisface los dos requerimientos anteriores, entonces el procedimiento simplificado podrá realizarse. El primer paso es determinar la relación de esfuerzos cíclicos (CSR) inducida por el sismo.



Análisis del Potencial de Licuación

- **INTRODUCCIÓN:**
- El principal desconocimiento en el cálculo de la CSR es la aceleración horizontal máxima del terreno $a_{m\acute{a}x}$ que se utilizará en el análisis. Típicamente un análisis de licuación no es necesario para sitios con una aceleración horizontal máxima menor de 0.10g o una magnitud local M_L menor de 5.
- CRR de la Prueba de Penetración Estándar: La relación de resistencia cíclica (CRR) de un suelo in situ es determinada utilizando la SPT.



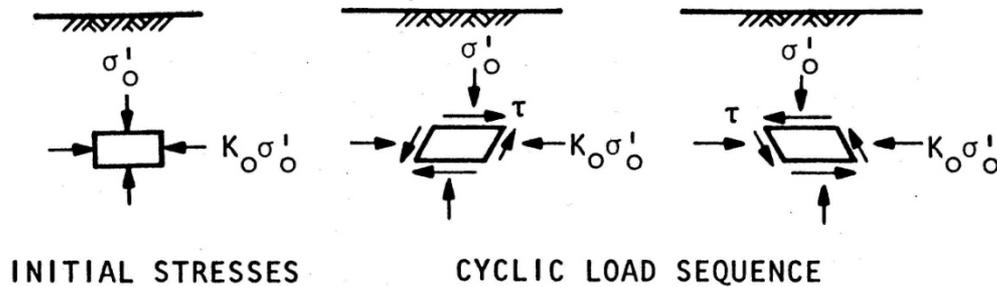
Análisis del Potencial de Licuación

- **INTRODUCCIÓN:**
- Si el CSR inducido por el sismo es mayor que el CRR determinado a partir de los resultados de la SPT, entonces es probable que ocurra la licuación durante el sismo, y viceversa.
- Factor de seguridad (FS): El paso final es determinar el factor de seguridad contra la licuación, el cual es definido como

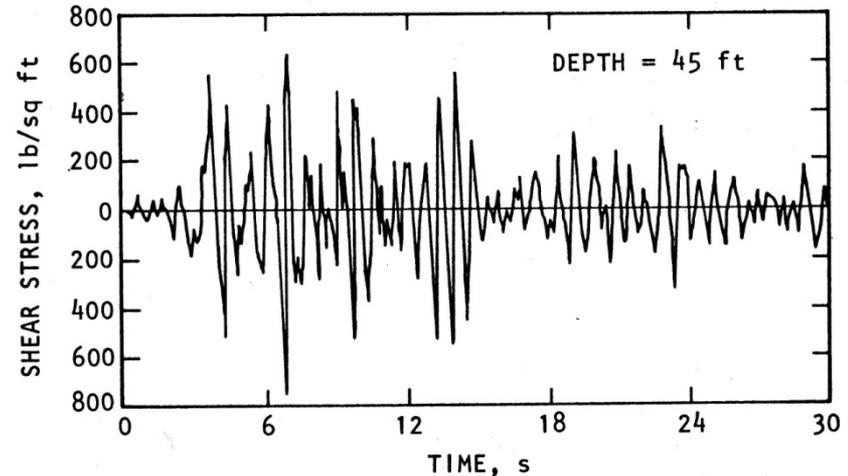
$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

Análisis del Potencial de Licuación

- RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:



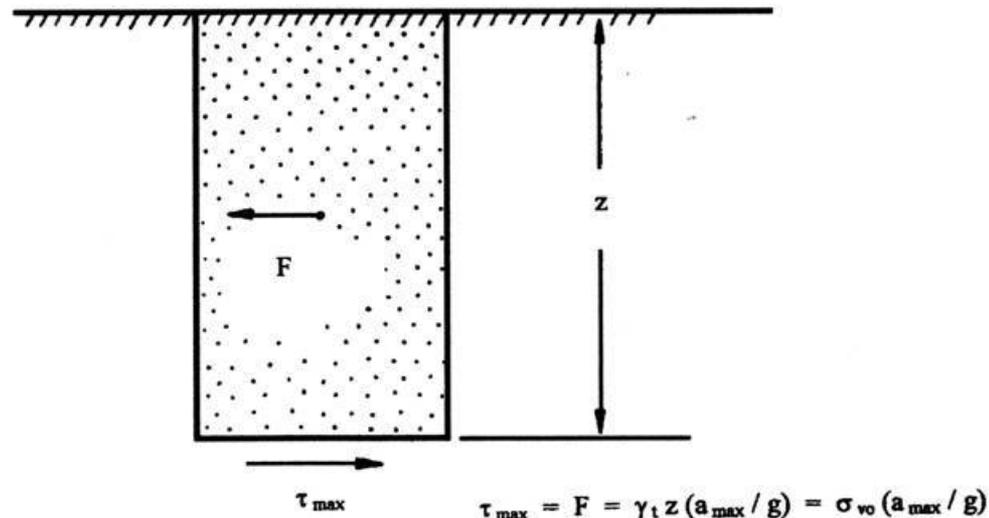
(a) Idealized field loading conditions



(b) Shear stress variation determined by response analysis

Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:** Para desarrollar la ecuación de CSR se asume una superficie de terreno a nivel y una columna de suelo de longitud z y ancho unitario, y que el suelo se mueve horizontalmente como un cuerpo rígido en respuesta a la máxima aceleración horizontal a_{\max} ejercida por el sismo.





Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:**
- El peso W de la columna de suelo es igual a $\gamma_t z$, donde
- γ_t = peso unitario total del suelo
- z = profundidad por debajo de la superficie del terreno
- La fuerza sísmica horizontal, F , actuando sobre la columna de suelo (la cual tiene longitud z y un ancho unitario) es:

$$F = ma = \left(\frac{W}{g} \right) a = \left(\frac{\gamma_t z}{g} \right) a_{\max} = \sigma_{vo} \left(\frac{a_{\max}}{g} \right)$$



Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:**
- por sumatoria de fuerzas en la dirección horizontal

$$\tau_{\max} = F = \sigma_{v0} \left(\frac{a_{\max}}{g} \right)$$

- dividiendo ambos lados por el esfuerzo efectivo vertical

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma'_{v0}} = \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \left(\frac{a_{\max}}{g} \right)$$



Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:**
- Debido a que la columna de suelo no se comporta como un cuerpo rígido durante el sismo, sino que el suelo es deformable,
- Seed & Idriss (1971) incorporaron un factor de reducción, r_d , por profundidad en el lado derecho de la ecuación anterior, o

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma'_{v0}} = r_d \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \left(\frac{a_{\max}}{g} \right)$$

Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:**

Observe que con la profundidad El factor r_d disminuye para considerar el hecho de que el suelo no es un cuerpo rígido sino deformable.

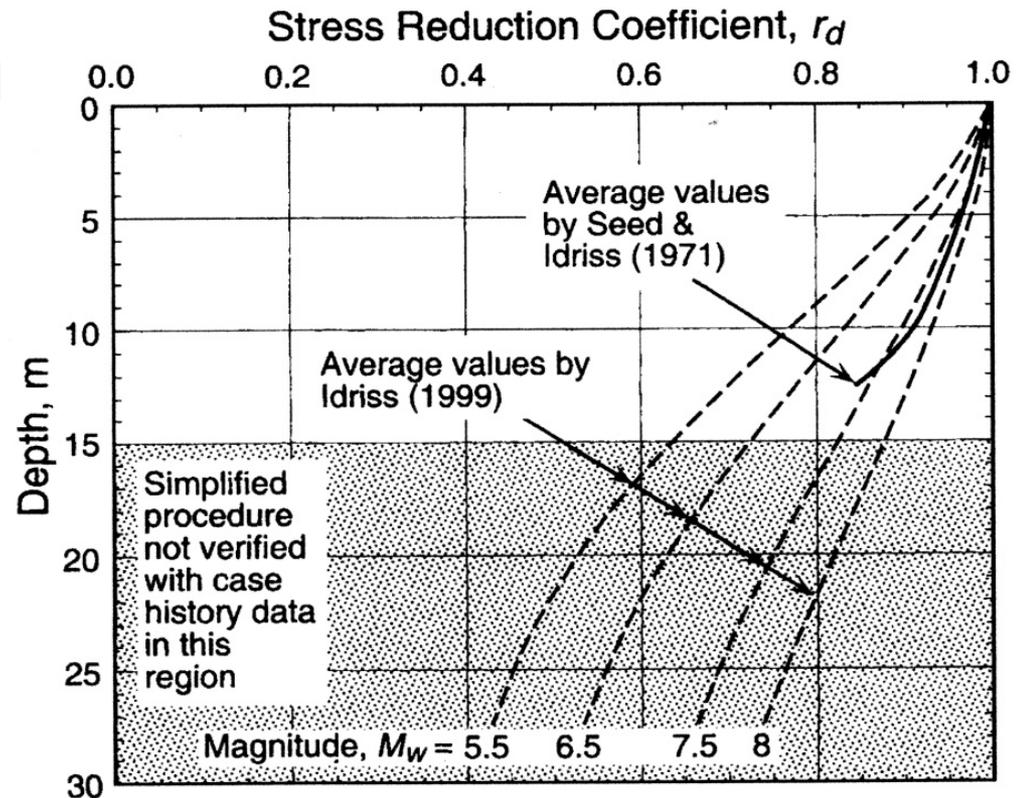


FIGURE 6.5 Reduction factor r_d versus depth below level or gently sloping ground surfaces. (From Andrus and Stokoe 2000, reproduced with permission from the American Society of Civil Engineers.)



Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:**
- Otra opción es suponer una relación lineal de r_d versus la profundidad usando la siguiente ecuación (Kayen et al. 1992):

$$r_d = 1 - 0.012z$$

- donde z = profundidad en metros por debajo de la superficie del terreno donde se realiza el análisis (o sea la misma profundidad para calcular σ_{v0} y σ'_{v0}).



Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:**
- Tal como lo sugirieron Schneider & Mayne (1999), r_d puede obtenerse utilizando la siguiente expresión de Idriss (1999):

$$r_d = e^{[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M_w]}$$

- Donde z es la profundidad en metros hasta 25 m, alfa y beta son funciones de ajuste definidas como:

$$\alpha(z) = -1.01 - 1.06 \cdot \sin \left[\left(\frac{z}{11.73} \right) + 5.133 \right]$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \sin \left[\left(\frac{z}{11.28} \right) + 5.142 \right]$$



Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:**

- Magnitud del momento M_w

- Más útil medida para determinar la fuerza de grandes sismos, Kanamori (1977) y Hanks & Kanamori (1979) introdujeron la escala M_w :

$$M_w = -6.0 + 0.67 \log M_0$$

- Momento sísmico = $M_0 = \mu A_f D$

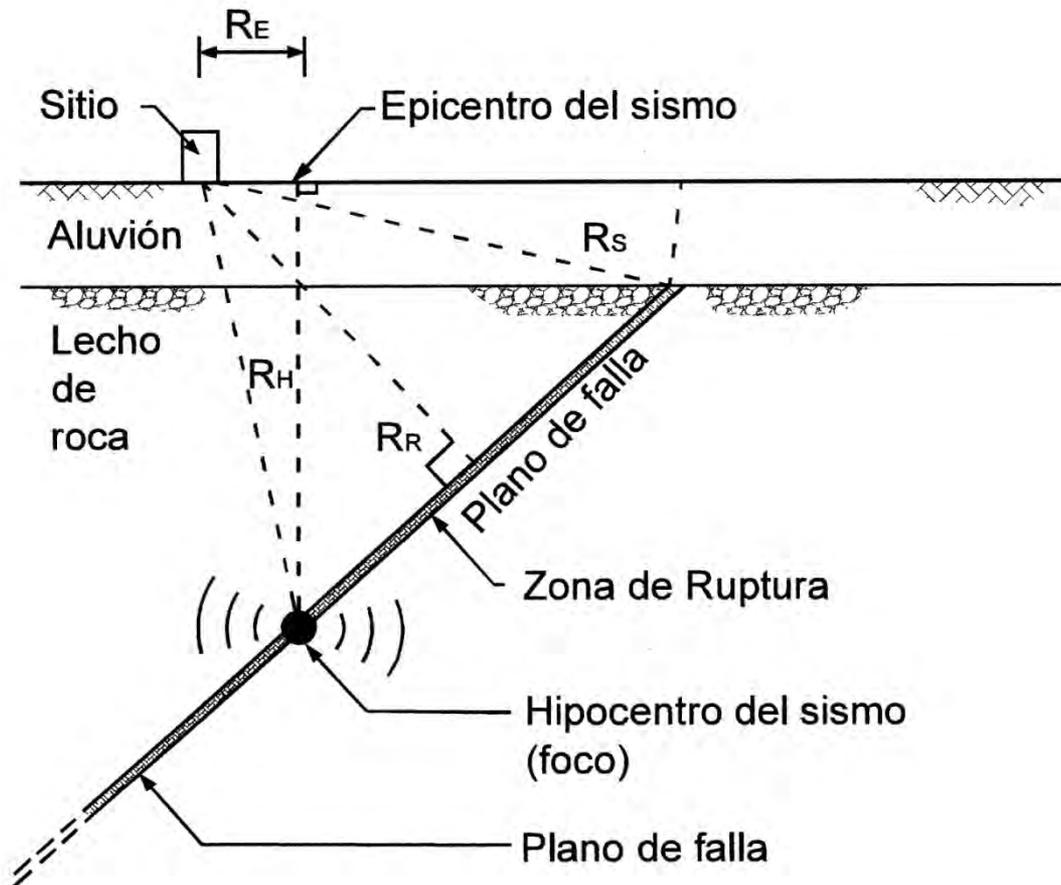
μ = módulo de corte del material a lo largo de la falla. Asuma 3×10^{10} N/m² para la corteza superficial y 7×10^{12} N/m² para el manto.

A_f = área del plano de la falla, m².

D = desplazamiento promedio del segmento de falla rupturado, m.

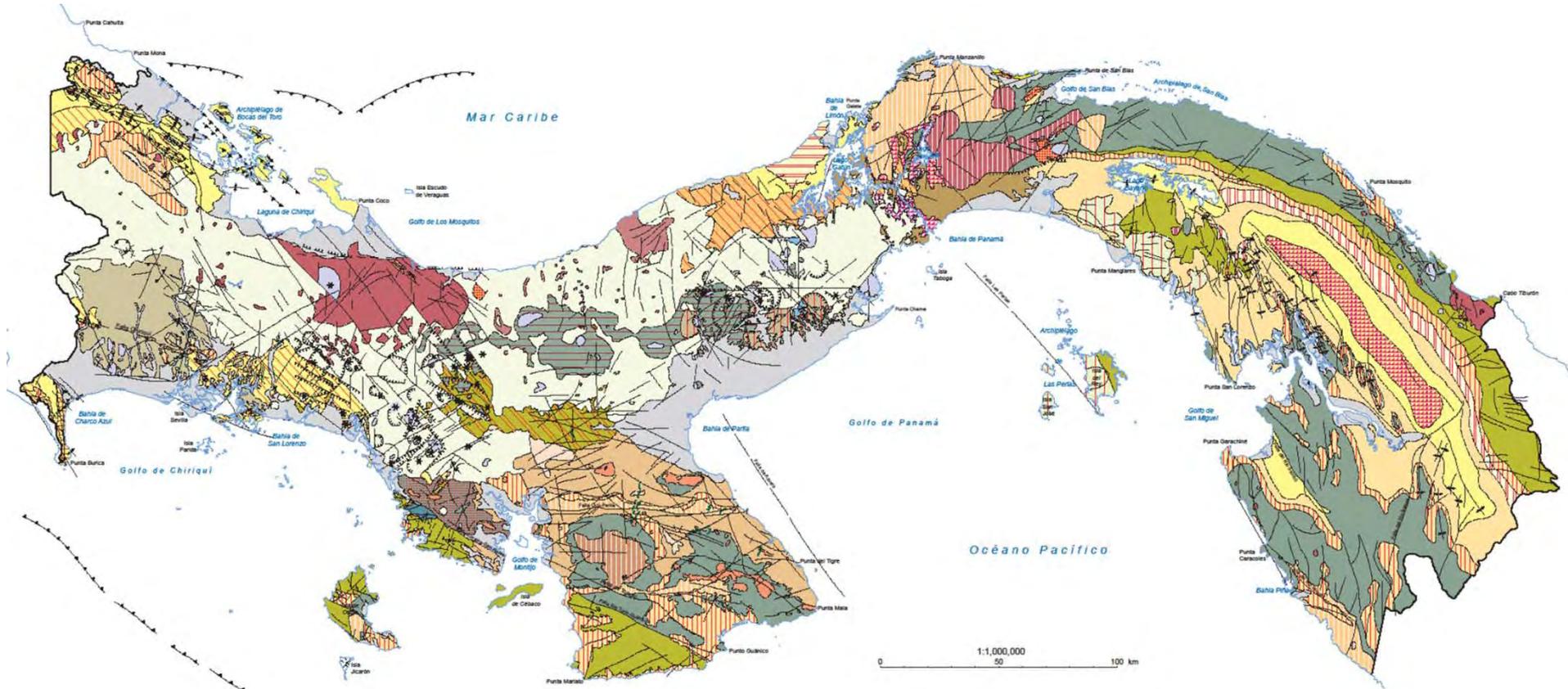
Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:**



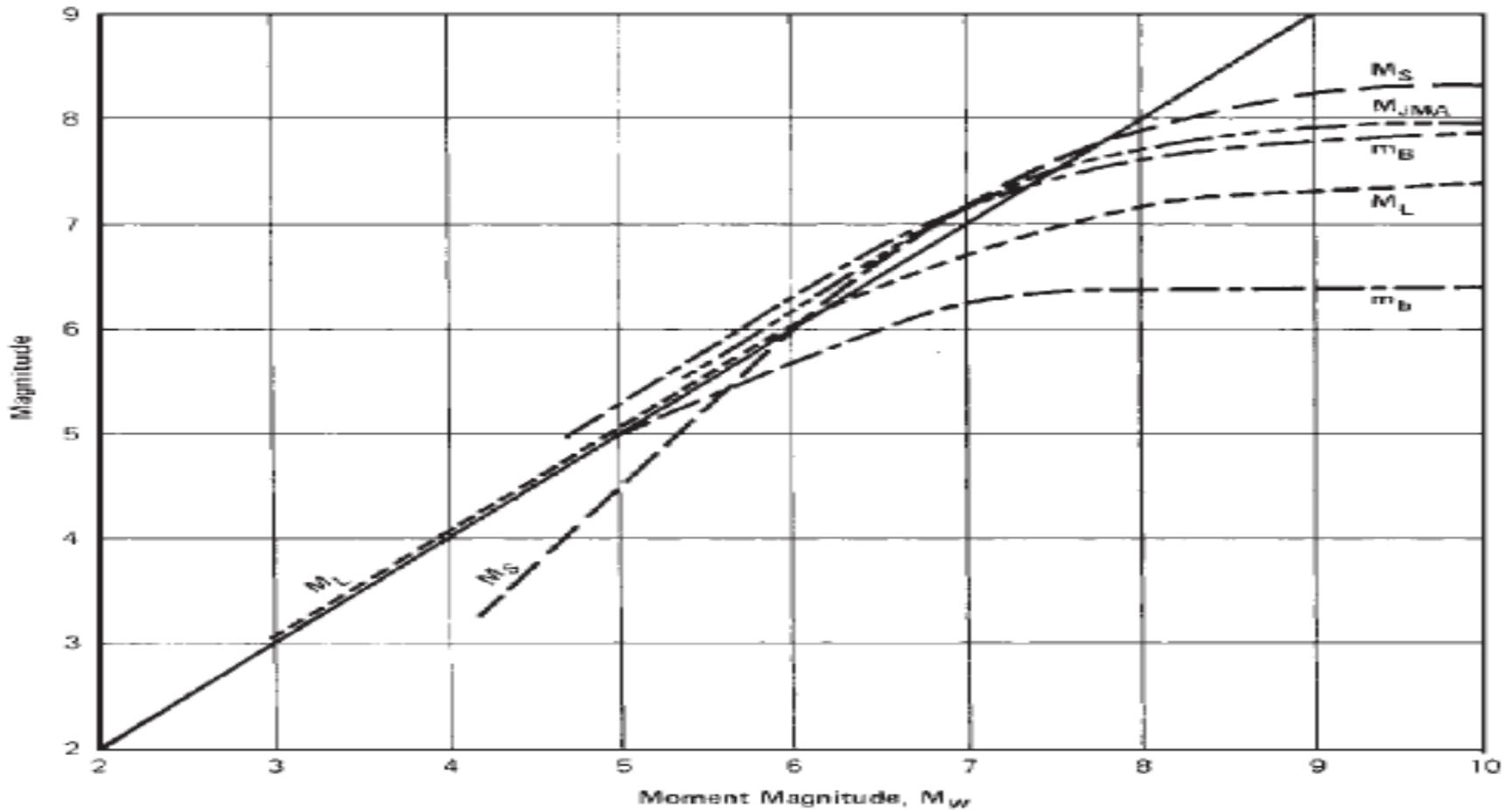
R_E = Distancia al epicentro
 R_R = Distancia a la falla
 R_S = Distancia sismogénica
 R_H = Distancia Hipocentral

Análisis del Potencial de Licuación



Mapa geológico de Panamá

Análisis del Potencial de Licuación

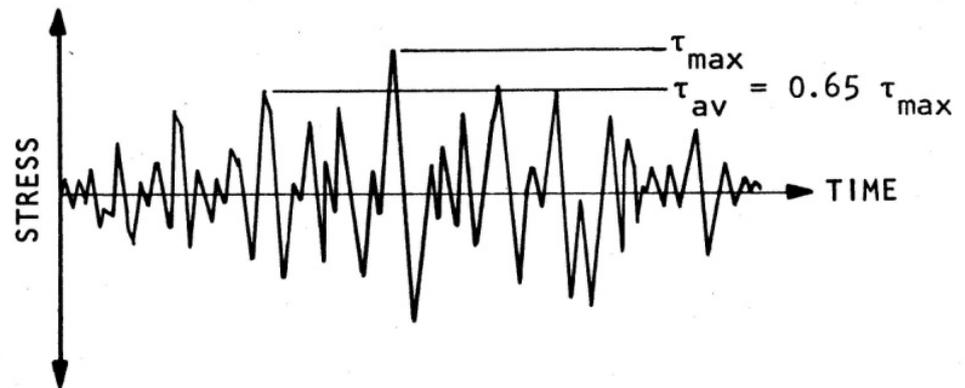


Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:**
- Para el método simplificado, Seed et al. (1975) convierte el típico registro sísmico irregular en una serie equivalente de esfuerzos cíclicos uniformes asumiendo la siguiente relación:

$$\tau_{cyc} = 0.65\tau_{max}$$

- donde τ_{cyc} = amplitud del esfuerzo cortante cíclico uniforme (valor medio) del sismo (lb/ft² o kPa).





Análisis del Potencial de Licuación

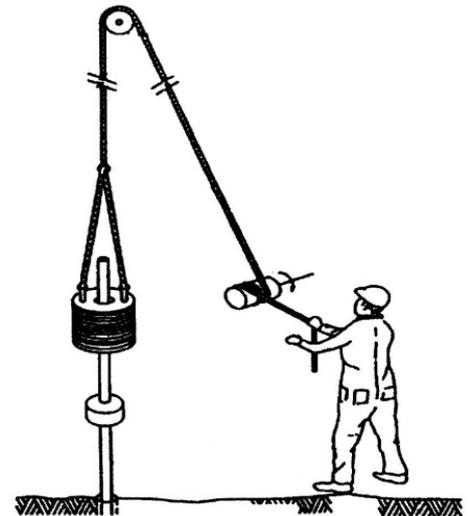
- **RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO CAUSADO POR EL SISMO:**
- En esencia, el movimiento sísmico errático fue convertido en una serie equivalente de ciclos uniformes de esfuerzos cortantes (valor medio), referido como τ_{cyc}
- Así se obtiene la relación de esfuerzo cíclico (CSR):

$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{v0}} = 0.65r_d \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \left(\frac{a_{max}}{g} \right)$$

Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE RESISTENCIA CÍCLICA (CRR) A PARTIR DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT):**
- El segundo paso en el procedimiento simplificado es determinar la CRR del suelo in situ. La CRR representa la resistencia a la licuación de un suelo in situ. El método más utilizado para determinarla es con los datos con los datos de la SPT.

José Harris





Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE RESISTENCIA CÍCLICA (CRR) A PARTIR DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT):**
- Un suelo denso bien graduado que haya sido precargado o antiguo será resistente a la licuación y tendrá valores altos de $(N_1)_{60}$.
- Igualmente, un suelo uniformemente graduado con una estructura segregada y suelta será más susceptible a la licuación y tendrá valores bajos de $(N_1)_{60}$.



Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE RESISTENCIA CÍCLICA (CRR) A PARTIR DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT):**

TABLE 5.3 Correlation between $(N_1)_{60}$ and Density of Sand

$(N_1)_{60}$ (blows per foot)	Sand density	Relative density D_r , percent
0–2	Very loose condition	0–15
2–5	Loose condition	15–35
5–20	Medium condition	35–65
20–35	Dense condition	65–85
Over 35	Very dense condition	85–100

Source: Tokimatsu and Seed (1987).



Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE RESISTENCIA CÍCLICA (CRR) A PARTIR DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT):**
- Basado en los resultados de la SPT, Seed et al. (1985) concluyó que se pueden identificar tres rangos de daño potencial:

$(N_1)_{60}$	Daño potencial
0-20	Alto
20-30	Intermedio
>30	Sin daño significativo

Análisis del Potencial de Licuación

- RELACIÓN DE RESISTENCIA CÍCLICA (CRR) A PARTIR DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT):

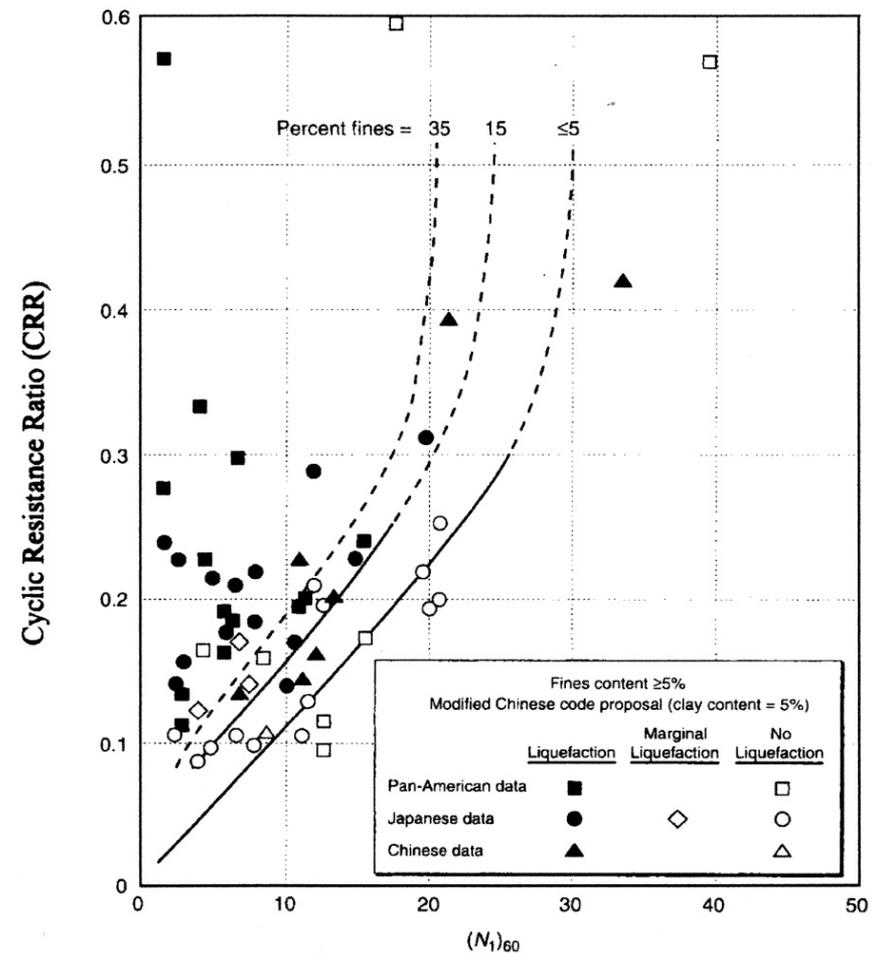


FIGURE 6.6 Plot used to determine the cyclic resistance ratio for clean and silty sands for $M = 7.5$ earthquakes. (After Seed et al. 1985, reprinted with permission of the American Society of Civil Engineers.)



Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE RESISTENCIA CÍCLICA (CRR) A PARTIR DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT):**

La Figura 6.6 fue desarrollada para un sismo de magnitud 7.5; para otras magnitudes los valores de CRR se multiplicarán por un factor de escala (MSF).

TABLE 6.2 Magnitude Scaling Factors

Anticipated earthquake magnitude	Magnitude scaling factor (MSF)
8½	0.89
7½	1.00
6¾	1.13
6	1.32
5¼	1.50

Note: To determine the cyclic resistance ratio of the in situ soil, multiply the magnitude scaling factor indicated above by the cyclic resistance ratio determined from Fig. 6.6.

Source: Seed et al. (1985).



Análisis del Potencial de Licuación

- **RELACIÓN DE RESISTENCIA CÍCLICA (CRR) A PARTIR DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT):**
- Dos factores de corrección adicional pueden ser incluidos en el análisis. El primero es para la licuación de estratos profundos de suelo (o sea, profundidades donde $\sigma'_{v0} > 100$ kPa, en el cual la licuación no ha sido verificada por el procedimiento simplificado. El segundo factor de corrección es por condiciones de terreno inclinado.



Análisis del Potencial de Licuación

- **FACTOR DE SEGURIDAD CONTRA LA LICUACIÓN:**
- El paso final en el análisis es calcular el factor de seguridad contra la licuación.

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$

- Mientras más alto sea el factor de seguridad, más resistente es el suelo a la licuación. No obstante, suelos con un FS ligeramente mayor de 1.0 pueden licuar durante un sismo. Valores aceptables del FS 1.30 a 1.50

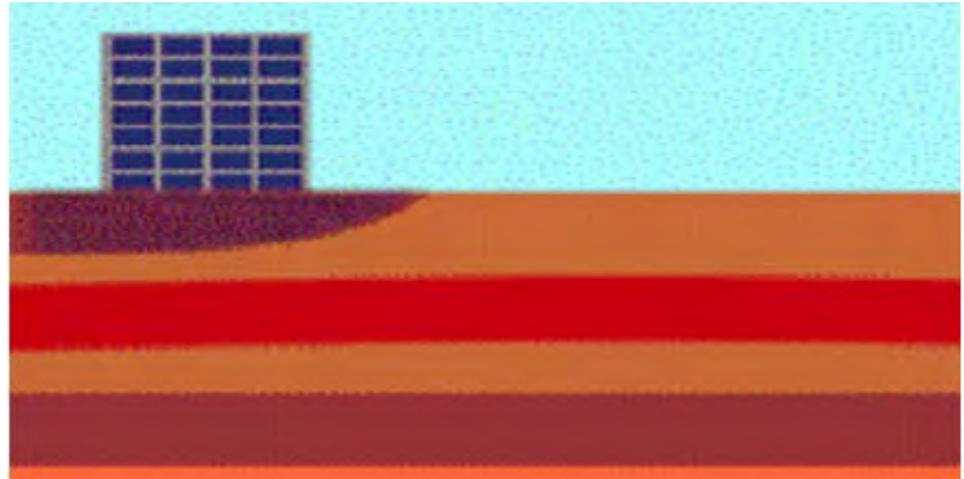


Análisis del Potencial de Licuación

- **FACTOR DE SEGURIDAD CONTRA LA LICUACIÓN:**
- Para resolver las incertidumbres en el procedimiento de Seed & Idriss el procedimiento simplificado puede interpretarse en la siguiente forma:
- Si el factor de seguridad contra licuación es menor de 1.1. equivale a que ocurre licuación ($r_u = 1.0$) y si el factor de seguridad es mayor de 1.3 equivale a que no ocurre licuación ($r_u = 0$).

Análisis del Potencial de Licuación

- **EJEMPLO:**
- Se ha planeado construir una edificación sobre un depósito de arena (suelo no cohesivo) con un porcentaje de finos, $PF < 5\%$. Se ubica cerca de una falla activa, y el ingeniero geotécnico ha determinado que para el sismo anticipado, la aceleración máxima del terreno será
- $a_{\text{máx}} = 0.40g \approx 4 \text{ m/s}^2$





Análisis del Potencial de Licuación

- **EJEMPLO:**
- El depósito de arena tiene una superficie del terreno a nivel, un peso unitario total γ_t por encima del NF de 18.9 kN/m^3 (120 lb/ft^3), un peso específico sumergido γ_b de 9.84 kN/m^3 (62.6 lb/ft^3).
- El NF está ubicado a 1.5 m (5 ft) por debajo de la superficie del terreno.
- El ensayo SPT fue realizado en un hoyo de 0.10 m (4 in) de diámetro. A una profundidad de 3 m (10 ft), se utilizó un martillo tipo Donut con un conteo de golpes $N = 3-4-5 = 9 \text{ golpes/ft}$



Análisis del Potencial de Licuación

- **EJEMPLO:**
- $N_{60} = 5.1$
- $(N_1)_{60} = 7.7 = 8$
- Asumiendo presiones de poro hidrostáticas.
- Magnitud anticipada del sismo de $M_w = 7.5$
- Calcule el FS contra la licuación para la arena saturada localizada a una profundidad de 3 m por debajo de la superficie del terreno.



Análisis del Potencial de Licuación

- SOLUCIÓN:**

$$\sigma'_{v0} = 18.9(1.5) + 9.84(1.5) = 43.1 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$\sigma_{v0} = 18.9(1.5) + (9.84 + 9.81)(1.5) = 57.8 \text{ kN} / \text{m}^2$$

$$\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} = 1.34$$

$$\frac{a_{m\acute{a}x}}{g} = 0.40$$

$$r_d = 1 - 0.012z = 1 - 0.012(3.0) = 0.96$$

$$CSR = 0.65 r_d \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \left(\frac{a_{m\acute{a}x}}{g} \right) = 0.65(0.96)(1.34)(0.40) = 0.33$$

$$CRR = 0.1 \rightarrow \text{Figura 6.6}$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = 0.30$$

Análisis del Potencial de Licuación





Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**

Nataraja & Gill (1983) describieron un método el cual hace uso de información de pruebas de penetración estándar (SPT) en el que se comparan los esfuerzos de cortante inducidos por el oleaje con los valores requeridos para causar licuación.

Este procedimiento incluye los siguientes pasos:

- 1) La selección de la información de la ola de diseño; requiere ser la altura de la ola significativa, el periodo de la ola significativa, la altura de la ola más grande, longitud de onda y la profundidad de las aguas mansas.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**

2) El cálculo de las presiones en el fondo inducidas por el oleaje, p_o , usando la ecuación:

$$p_o = \gamma_w \frac{H}{2} \frac{1}{\cosh(2\pi h / L)}$$

donde:

Amplitud de la presión, p_o

Peso volumétrico del agua, γ_w

Profundidad del agua, h





Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**

Los valores L y H se obtienen de la solución de la teoría de la pequeña amplitud de onda (Teoría de Airy):

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(2\pi h/L)$$

donde:

$$H = H_o \left[\left(1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right) \tanh(2\pi h/L) \right]^{-1/2}$$

Longitud de onda, L

Aceleración de la gravedad, g

Altura de las olas para aguas profundas, H_o

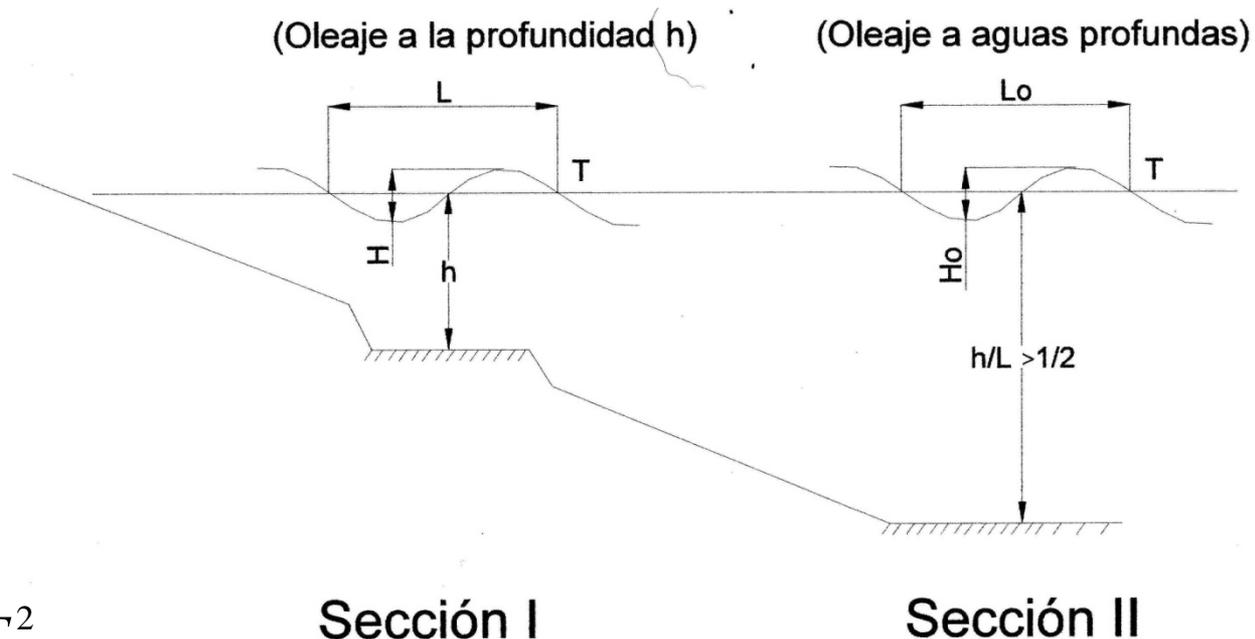
Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**

- La condición de aguas profundas ocurre si $h/L > 1/2$

- Para este caso, la longitud de onda de la ola está dada por:

$$L_o = \frac{gT^2}{2\pi}$$



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**
- Las ecuaciones anteriores muestran que la amplitud de la presión inducida por el oleaje, p_o depende del conocimiento de la longitud de la longitud de la ola a aguas profundas L_o y la altura de la H_o .
- Ishihara y Yamazaki (1984) muestran que la relación H_o/L_o puede variar en el rango de:

$$0.008 \leq H_o / L_o \leq 0.055$$



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**

3) Se calcula la amplitud del esfuerzo cortante inducido por el τ_{vh} oleaje, usando la ecuación:

donde:

$$\tau_{vh} = p_o \lambda z \exp(-\lambda z) \text{sen}(\lambda x - \omega t)$$

p_o = amplitud de la presión inducida por el oleaje,

z = distancia debajo de la línea de sedimento,

x = coordenada horizontal

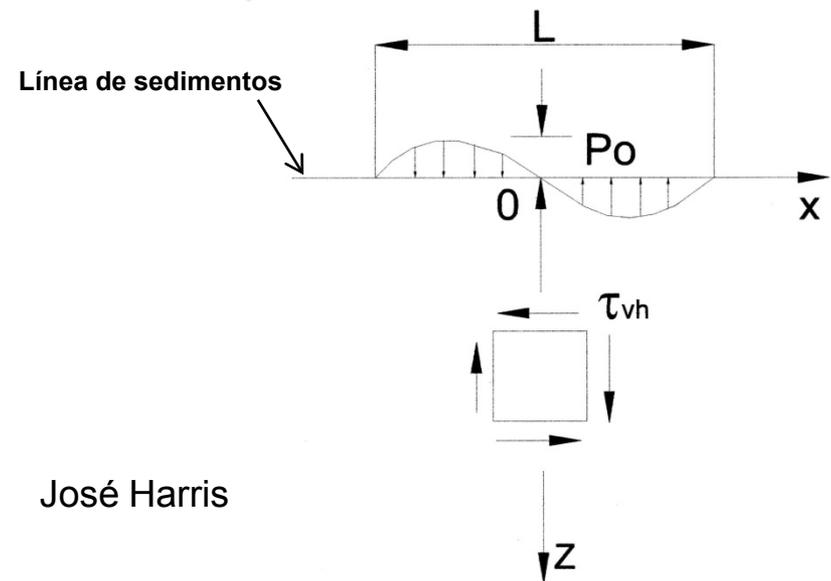
L = longitud de onda

t = tiempo

T = periodo

frecuencia circular, $\omega = 2\pi / T$

$\lambda = 2\pi / L$



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**

Normalmente los primeros metros son críticos y los cálculos hasta una profundidad de un cuarto de la longitud de onda pueden ser adecuados.

Si la profundidad de interés es menor que el 10% de la longitud de onda ($z/L \leq 0.1$), la siguiente aproximación lineal puede ser usada:

$$\tau_{vh} \approx 3.25 p_o z / L$$





Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**

4) Se estima el esfuerzo cortante cíclico de la información de la prueba SPT.

Esto se hace seleccionando primero un perfil de diseño de valores de N y convirtiendo los mismos a valores modificados N_1 usando la siguiente ecuación:

$$N_1 = \left(1 - 1.25 \log_{10} \frac{\sigma'_v}{\sigma'_1} \right) N$$

donde:

σ'_v = presión de sobrecarga efectiva,

σ'_1 = presión unitaria



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**

$$N_{corr} = N1 = C_n \times N \quad (3)$$

y se ha estandarizado a un esfuerzo vertical de referencia $\sigma_{vr}' = 1 \text{ kg/cm}^2 \approx 1 \text{ atmósfera} = p_a$, como función del parámetro R_s , definido por:

$$R_s = \sigma_v'/p_a \quad (4)$$

Existen numerosas propuestas, entre las que se destacan las siguientes (Figura 2) :

Peck	$C_n = \log(20/R_s)/\log(20)$	(5a)
Seed	$C_n = 1 - 1.25\log(R_s)$	(5b)
Meyerhof-Ishihara	$C_n = 1.7/(0.7+R_s)$	(5c)
Liao-Whitman	$C_n = (1/R_s)^{0.5}$	(5d)
Skempton	$C_n = 2/(1+R_s)$	(5e)
Seed-Idriss (Marcuson)	$C_n = 1 - K \cdot \log R_s$ ($K=1.41$ para $R_s < 1$; $K=0.92$ para $R_s \geq 1$)	(5f)
González (Logaritmo)	$C_n = \log(10/R_s)$	(5g)
Schmertmann	$C_n = 32.5/(10.2+20.3R_s)$	(5h)

En general se recomienda que $C_n \leq 2.0$, por lo cual la formulación de Skempton es la única que cumple exactamente esta recomendación para $R_s = 0$.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:

CORRECCION DE SPT - VALORES DE C_n EN $N1=C_n*N$

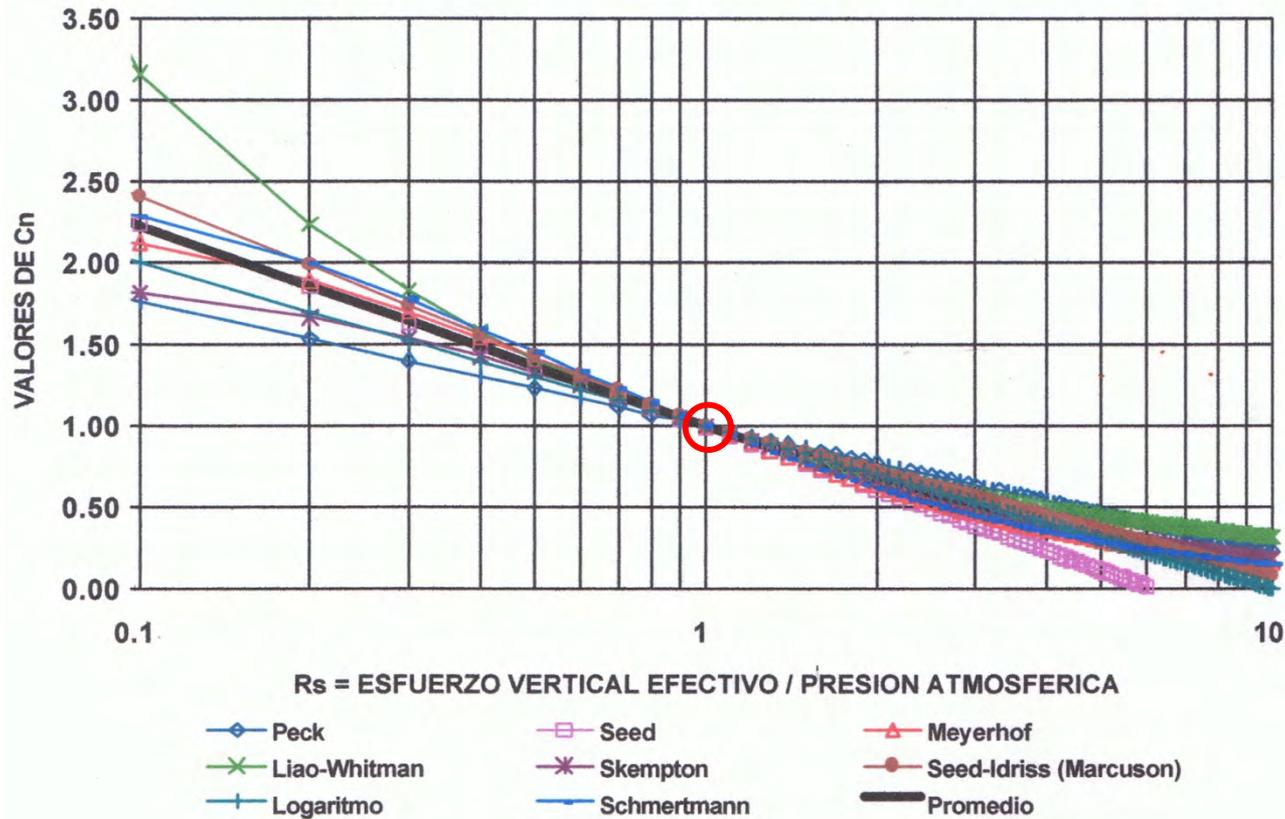


Figura 2 - Valores de C_n



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**

$$N_1 = \left(1 - 1.25 \log_{10} \frac{\sigma_v'}{\sigma_1'} \right) N = C_N N$$

$$C_N = 1 - 1.25 \log_{10} \frac{\sigma_v'}{\sigma_1'}$$

$$\sigma_1' = 1 \text{ atm} = 1.03327 \text{ kg/cm}^2 = 1.058108 \text{ tsf} = 101.325 \text{ kPa}$$

$$C_N = 1 - 1.25 \log_{10} \frac{\sigma_v'}{10}, \quad \sigma_1' \approx 10 \text{ t/m}^2$$

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**

Se calculan los esfuerzos cortantes cíclicos requeridos para causar licuación, ya sea de información disponible de pruebas o de relaciones empíricas simplificadas:

$$\left(\frac{\tau}{\sigma'_v} \right)_l = 0.009 N_1$$

De esta manera, el esfuerzo cortante que causa la licuación puede determinarse como:

$$\tau_l = 0.009 N_1 \sigma'_v$$



A close-up photograph of a water splash, showing a large, dark, circular droplet in the center, surrounded by smaller, lighter droplets and a white, frothy rim. The background is a deep blue gradient.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **ANÁLISIS DE NATARAJA & GILL:**

5) Finalmente el factor de seguridad se calcula como una función de la profundidad y la relación:

$$FS = \tau_l / \tau_{vh}$$

Nataraja y Gill enfatizaron que este método no pretende ser un sustituto para análisis y pruebas sofisticadas de laboratorio, pero si como un primer paso en la determinación de un análisis detallado.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

- **EJEMPLO:**

2.1 Estudios previos

2.1.1 Levantamiento batimétrico

Del levantamiento batimétrico se tomaron en cuenta la sección tipo del canal de acceso así como las dimensiones de la escollera,

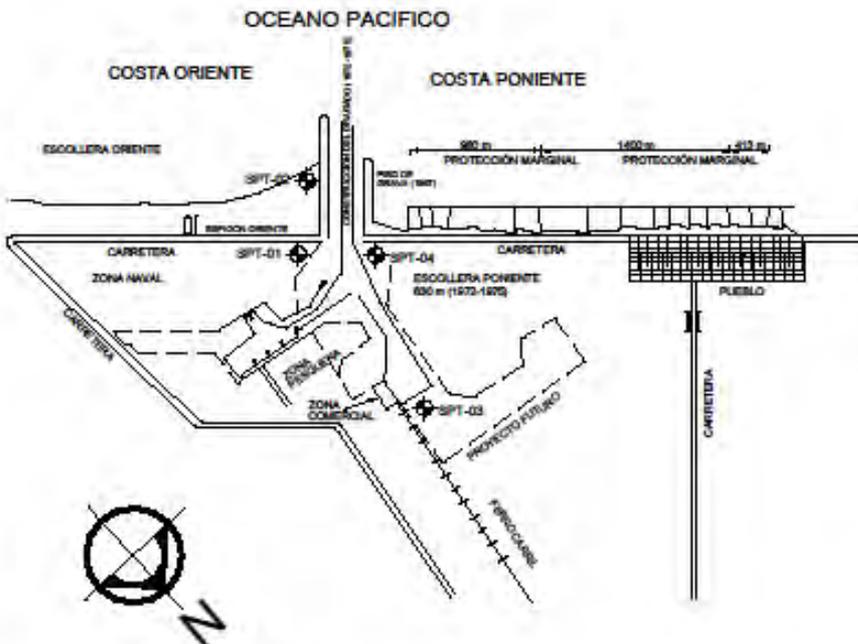


Figura 2.3 Localización de los sondeos exploratorios, pruebas de penetración estándar (SPT)

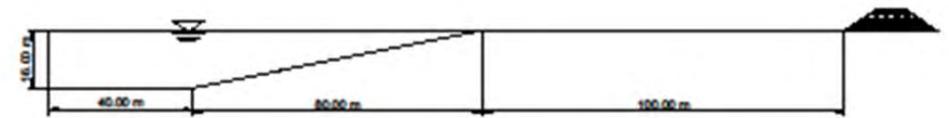


Figura 2.1. Sección tipo, al poniente del canal de acceso (la sección es simétrica)

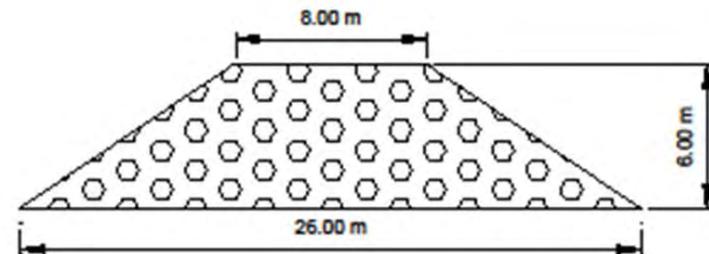


Figura 2.2. Sección tipo de la escollera utilizada

A graphic showing a splash of water with several droplets and ripples, set against a dark blue background. The water is captured in a dynamic, mid-air state, creating a sense of movement and energy.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

2.1.2 Estudio geotécnico

Para la modernización de Puerto Madero en Chiapas es necesario hacer estudios relacionados con la ampliación de la sección del canal de acceso. Dichos estudios están enfocados con el análisis de la estabilidad de los taludes tomando en consideración diferentes profundidades de dragado que toman valores de 10, 12, 15 y 16 m. La propuesta inicial en cuanto a la inclinación de los taludes es de 5:1. El canal de acceso al puerto y la localización de los sondeos exploratorios se muestran en la Figura 2.3



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

2.1.2.1 Determinación de las características físicas y esfuerzos de los materiales encontrados en los cuatro sondeos realizados en Puerto Madero, Chiapas

De la información obtenida de las exploraciones realizadas en los sondeos efectuados, se realizó el cálculo y determinación de sus propiedades con el fin de utilizarlas para el análisis de la estabilidad de los taludes en el canal de acceso al puerto.

2.1.2.2 Determinación del γ_{sat} peso específico saturado

$$\gamma_{sat} = (1 + w) * \gamma_w S_s / (1 + w S_s) \quad (2.1)$$

Donde:

W	Humedad del material
γ_w	Peso específico del agua = 10 kN/m ³
S _s	Densidad de sólidos

Para la utilización de la ecuación 2.1, se hizo uso de los datos de los porcentajes de humedad obtenidos del estudio de mecánica de suelos efectuado en los cuatro sondeos exploratorios realizados en Puerto Madero. Los resultados se presentan en la Tabla 2.1.

El análisis de los esfuerzos verticales que se presentan en los taludes en cuestión son considerando un material areno - limoso el cual presenta una compactación relativa de media a firme, los valores del esfuerzo vertical se presentan en la Tabla 2.1. Se consideran los esfuerzos a las profundidades a las cuales se obtuvieron las muestras (sondeos exploratorios).

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.1 a) Características físicas del material, sondeo exploratorio No. 1

Prof. de	W %	S _s	γ _{sat} kN/m ³	F %	A %	G %	N _f	σ Kn/m ²	σ' Kn/m ²	σ' Ton/ft ²	C _n	N'	
0.00	0.60	2.24	2.75	26.48	13.0	85.0	2.0	10	15.89	9.89	0.092	3.30	32.98
0.60	1.20	2.68	2.78	26.57	8.0	92.0	0.0	19	31.83	19.83	0.194	2.33	44.26
1.20	1.80	4.88	2.78	25.52	6.0	94.0	0.0	17	47.14	29.14	0.271	1.82	32.67
1.80	2.40	5.21	2.75	25.31	5.0	95.0	0.0	25	62.33	38.33	0.358	1.68	41.89
2.40	3.00	18.72	2.83	22.42	9.0	91.0	0.0	36	75.78	45.78	0.425	1.53	55.19
3.00	3.60	17.95	2.80	21.98	8.0	92.0	0.0	49	88.97	52.97	0.492	1.43	69.84
3.60	4.20	18.07	2.68	21.32	5.0	95.0	0.0	29	101.76	59.76	0.555	1.34	38.91
4.20	4.80	18.52	2.65	21.07	4.0	98.0	0.0	32	114.40	66.40	0.617	1.27	40.74
4.80	5.40	15.1	2.63	21.67	7.0	93.0	0.0	48	127.40	73.40	0.682	1.21	58.12
5.40	6.00	17.31	2.68	21.48	6.0	94.0	0.0	49	140.28	80.28	0.746	1.18	58.73
6.00	6.60	22.61	2.70	20.56	7.0	93.0	0.0	47	152.62	86.62	0.805	1.11	52.38
6.60	7.20	18.91	2.74	21.46	9.0	91.0	0.0	49	165.49	93.49	0.869	1.07	52.57
7.20	7.80	24.58	2.68	20.13	5.0	95.0	0.0	31	177.57	99.57	0.925	1.04	32.23
7.80	8.40	24.28	2.69	20.22	14.0	88.0	0.0	40	189.71	105.71	0.982	1.01	40.36
8.40	9.00	27.04	2.67	19.70	12.0	88.0	0.0	36	201.53	111.53	1.036	0.98	35.36
9.00	9.60	21.41	2.74	20.97	14.0	85.0	1.0	42	214.11	118.11	1.098	0.95	40.09
9.60	10.20	28.44	2.72	20.00	8.0	92.0	0.0	39	226.11	124.11	1.153	0.93	38.31
10.20	10.80	28.15	2.78	20.22	5.0	95.0	0.0	36	238.24	130.24	1.210	0.91	32.72
10.80	11.40	27.23	2.77	20.09	7.0	93.0	0.0	35	250.30	136.30	1.267	0.89	31.10
11.40	12.00	25.68	2.68	19.95	19.0	81.0	0.0	36	262.27	142.27	1.322	0.87	31.31
12.00	12.60	30.11	2.65	19.18	16.0	84.0	0.0	33	273.77	147.77	1.373	0.85	28.16
12.60	13.20	30.89	2.71	19.31	14.0	88.0	0.0	29	285.36	153.36	1.425	0.84	24.29
13.20	13.80	32.11	2.72	19.18	22.0	78.0	0.0	27	296.87	158.87	1.476	0.82	22.22
13.80	14.40	39.85	2.57	17.76	82.0	18.0	0.0	31	307.52	163.52	1.520	0.81	25.15
14.40	15.00	36.49	2.65	18.39	41.0	59.0	0.0	29	318.55	168.55	1.568	0.80	23.17

Donde:

- W humedad del material
- S_s densidad de sólidos
- γ_{sat} peso específico saturado kN/m³
- F porcentaje de material fino
- A porcentaje de arena
- G porcentaje de grava
- N_f número de golpes
- σ esfuerzo total
- σ' esfuerzo efectivo
- C_n factor de corrección
- N' número de golpes corregido

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.1 b) Características físicas del material, sondeo exploratorio No. 2

Prof.		W	S_u	γ_{sat}	F	A	G	NF	σ	σ'	σ''	Cu	N'
de	a	%		kN/m^3	%	%	%		kN/m^2	kN/m^2	Ton/m^2		
0.00	0.60	5.63	2.78	25.39	5.0	95.0	0.0	2	15.23	9.23	0.086	3.41	6.83
0.60	1.20	9.17	2.75	23.98	2.0	98.0	0.0	3	29.6201	17.62	0.164	2.47	7.41
1.20	1.80	21.00	2.69	20.80	26.0	74.0	0.0	25	42.0997	24.10	0.224	2.11	52.83
1.80	2.40	27.95	2.65	19.48	22.0	78.0	0.0	18	53.7872	29.79	0.277	1.90	34.21
2.40	3.00	24.53	2.70	20.23	24.0	76.0	0.0	19	65.9232	35.92	0.334	1.73	32.88
3.00	3.60	24.14	2.55	19.59	17.0	83.0	0.0	18	77.6797	41.68	0.387	1.61	28.92
3.60	4.20	28.59	2.50	18.75	14.0	86.0	0.0	17	88.9283	46.93	0.436	1.51	25.74
4.20	4.80	25.35	2.58	19.55	16.0	84.0	0.0	15	100.66	52.66	0.489	1.43	21.44
4.80	5.40	23.94	2.68	20.23	12.0	88.0	0.0	11	112.8	58.80	0.546	1.35	14.88
5.40	6.00	27.15	2.65	19.60	10.0	90.0	0.0	13	124.558	64.56	0.600	1.29	16.78
6.00	6.60	27.63	2.64	19.48	12.0	88.0	0.0	16	136.247	70.25	0.653	1.24	19.80
6.60	7.20	25.03	2.61	19.74	14.0	86.0	0.0	17	148.09	76.09	0.707	1.19	20.22
7.20	7.80	29.40	2.63	19.19	16.0	84.0	0.0	14	159.606	81.61	0.758	1.15	16.08
7.80	8.15	30.07	2.58	18.90	11.0	89.0	0.0	20	166.22	86.94	0.808	1.11	22.25
8.15	10.15							BT					

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.1 c) Características físicas del material, sondeo exploratorio No. 3

FUERTO MADERO CHIAPAS
SONDEOS EXPLORATORIOS DE PENETRACION ESTANDAR
SONDEO No. 3

Prof.		W	S _x	γ _{sat}	F	A	G	N ^o	σ	σ'	σ _v '	Cu	N
de	a	%		kN/m ³	%	%	%		kN/m ²	kN/m ²	Ton/m ²		
0.00	0.60	19.50	2.56	20.41	83.0	17.0	0.0	13	12.24	6.24	0.058	4.15	53.97
0.60	1.20	30.00	2.55	18.78	81.0	19.0	0.0	9	23.51	11.51	0.107	3.06	27.51
1.20	1.80	26.36	2.61	19.54	71.0	29.0	0.0	17	35.24	17.24	0.160	2.50	42.48
1.80	2.40	40.92	2.55	17.59	55.0	45.0	0.0	13	45.79	21.79	0.202	2.22	28.89
2.40	3.00	37.26	2.45	17.58	63.0	37.0	0.0	27	56.33	26.33	0.245	2.02	54.58
3.00	3.60	29.03	2.43	18.38	66.0	34.0	0.0	5	67.37	31.37	0.292	1.85	9.26
3.60	4.20	32.94	2.46	18.06	64.0	36.0	0.0	13	78.20	36.20	0.336	1.72	22.41
4.20	4.80	30.29	2.62	19.03	52.0	48.0	0.0	24	89.62	41.62	0.387	1.61	38.59
4.80	5.40	38.01	2.44	17.47	74.0	26.0	0.0	40	100.11	46.11	0.428	1.53	61.11
5.40	6.00	36.83	2.46	17.66	74.0	26.0	0.0	44	110.70	50.70	0.471	1.46	64.10
6.00	6.60	36.91	2.62	18.24	69.0	31.0	0.0	31	121.64	55.64	0.517	1.39	43.11
6.60	7.20	23.49	2.63	20.08	12.0	88.0	0.0	30	133.69	61.69	0.573	1.32	39.62
7.20	7.80	42.01	2.44	17.11	89.0	11.0	0.0	33	143.96	65.96	0.613	1.28	42.15
7.80	8.40	39.33	2.56	17.77				35	154.62	70.62	0.656	1.23	43.20
8.40	9.00	31.26	2.60	18.83	28.0	72.0	0.0	21	165.92	75.92	0.706	1.19	25.00
9.00	9.60	29.07	2.62	19.20	29.0	71.0	0.0	5	177.43	81.43	0.757	1.15	5.75
9.60	10.20	29.19	2.63	19.22	45.0	55.0	0.0	5	186.97	86.97	0.808	1.11	5.56
10.20	10.80	33.73	2.61	18.56	43.0	57.0	0.0	5	200.10	92.10	0.866	1.08	5.40
10.80	11.40	29.99	2.53	18.70				19	211.32	97.32	0.904	1.05	19.98
11.40	12.00	36.32	2.41	17.52	65.0	35.0	0.0	50	221.83	101.83	0.946	1.03	51.40
12.00	12.60	35.67	2.40	17.54	64.0	36.0	0.0	50	232.36	106.36	0.988	1.01	50.29
12.60	13.20	30.91	2.14	16.86	58.0	42.0	0.0	50	242.48	110.48	1.027	0.99	49.34
13.20	13.80	34.10	2.16	16.68	57.0	43.0	0.0	50	252.48	114.48	1.064	0.97	48.47
13.80	14.40	35.16	2.18	16.68	56.0	44.0	0.0	48	262.49	118.49	1.101	0.95	45.74
14.40	15.00	31.54	2.41	18.01	46.0	54.0	0.0	49	273.30	123.30	1.146	0.93	45.77

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.1 d) Características físicas del material, sondeo exploratorio No. 4

Prof. de	W %	S _s	γ _{sat} kN/m ³	F %	A %	G %	Nf	σ Kn/m ²	σ' Kn/m ²	σ' Ton/ft ²	Cn	N'	
0,00	0,60	4,13	2,78	25,97	9	91	0	18	15,58	9,58	0,089	3,35	60,32
0,60	1,20	4,90	2,75	25,42	8	92	0	26	30,83	18,83	0,175	2,39	62,15
1,20	1,80	3,41	2,77	26,17	9	91	0	33	46,54	28,54	0,265	1,94	64,08
1,80	2,40	13,64	2,80	23,03	6	94	0	26	60,35	36,35	0,338	1,72	44,73
2,40	3,00	11,54	2,74	23,22	8	92	0	30	74,28	44,28	0,412	1,56	46,76
3,00	3,60	19,71	2,69	21,04	9	91	0	33	86,91	50,91	0,473	1,45	47,98
3,60	4,20	23,24	2,65	20,21	6	94	0	40	99,04	57,04	0,530	1,37	54,94
4,20	4,80	20,51	2,67	20,79	8	92	0	38	111,51	63,51	0,590	1,30	49,46
4,80	5,40	25,23	2,72	20,20	7	93	0	39	123,63	69,63	0,647	1,24	48,48
5,40	6,00	22,73	2,70	20,53	9	91	0	38	135,95	75,95	0,706	1,19	45,23
6,00	6,60	27,09	2,68	19,73	6	94	0	31	147,79	81,79	0,760	1,15	35,56
6,60	7,20	27,61	2,62	19,40	13	87	0	33	159,43	87,43	0,813	1,11	36,61
7,20	7,80	24,44	2,73	20,38	9	91	0	36	171,66	93,66	0,870	1,07	38,59
7,80	8,40	22,19	2,70	20,63	10	90	0	33	184,04	100,04	0,930	1,04	34,22
8,40	9,00	31,15	2,63	18,96	—	—	—	34	195,41	105,41	0,980	1,01	34,35
9,00	9,60	32,66	2,74	19,18	14	86	0	31	206,92	110,92	1,031	0,98	30,53
9,60	10,20	27,00	2,71	19,87	18	82	0	33	218,85	116,85	1,086	0,96	31,67
10,20	10,80	28,29	2,69	19,60	18	82	0	37	230,61	122,61	1,139	0,94	34,66
10,80	11,40	33,42	2,67	18,83	14	86	0	38	241,90	127,90	1,189	0,92	34,85
11,40	12,00	26,92	2,81	20,30	20	80	0	40	254,08	134,08	1,246	0,90	35,83
12,00	12,60	31,06	2,79	19,59	17	83	0	40	265,84	139,84	1,300	0,88	35,09
12,60	13,20	28,68	2,67	19,46	18	82	0	37	277,51	145,51	1,352	0,86	31,82
13,20	13,80	29,04	2,65	19,32	16	84	0	37	289,11	151,11	1,404	0,84	31,22
13,80	14,40	28,41	2,69	19,58				17	300,85	156,85	1,458	0,83	14,08
14,40	15,00	41,91	2,61	17,69				50	311,47	161,47	1,501	0,82	40,82



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

2.1.2.3 Corrección del número de golpes en la prueba de penetración estándar

El número de golpes en pruebas de penetración estándar y su correspondiente corrección (debida al confinamiento con la profundidad) se relaciona con la siguiente ecuación:

$$N' = C_n N_f \quad (2.2)$$

Donde:

- C_n factor de corrección
- N_f número de golpes, SPT
- N' número de golpes corregido, SPT

El factor de corrección C_n se determina como sigue:

$$C_n = (1/\sigma')^{1/2} \quad (2.3)$$

Donde:

σ' está expresada en ton/ft²



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

La literatura (Das, Braja M. 1994) presenta valores de densidad relativa de un material y el ángulo de fricción interna que puede presentar para diferentes valores en número de golpes, corregidos con la profundidad, en pruebas de penetración estándar, estos valores se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Determinación de la densidad relativa y el ángulo de fricción interna de un material (Das, Braja M. 1994)

No. De golpes corregido en pruebas SPT	Densidad relativa D_r %	Ángulo de fricción interna ϕ°
0-5	0-5	28-30
5-10	5-30	28-35
10-30	30-60	35-42
30-50	60-95	38-46

La mayoría del número de golpes corregidos N' , en las pruebas de penetración estándar toman valores comprendidos entre 30 y 40, lo cual corresponde a una densidad relativa entre 40 y 60% y un ángulo de fricción interna ϕ , entre 35 y 42°.



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Para el análisis de la estabilidad de los taludes se considera que el material presenta una compacidad relativa $D_r = 40\%$, y un ángulo de fricción interna de 35° .

En el sondeo No. 2, junto a la escollera oriente a una profundidad aproximada entre 8 y 10 m se encuentran boleos de roca granítica mezclados con arena. Hacia profundidades mayores la exploración se suspendió debido a que se encontró roca granítica.

2.1.3 Estudio de refracción de oleaje

Se consideran las tres propuestas siguientes:

- a) Opción 1. Prolongación de la escollera en 732 m, con inclinación de 45° .
- b) Opción 2. Prolongación de la escollera en 732 m, en línea recta.
- c) Opción 3. Condiciones actuales.

En las diferentes opciones se consideran las alturas de ola máxima que se puede presentar tomando en cuenta periodos de retorno de 50 años, y periodos de 15.7 y 14.3 segundos para condiciones de oleaje, considerando una profundidad de dragado de 10.0 m. Los datos se muestran en la Tabla 2.3.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.3 a) Datos del estudio de refracción de oleaje

Puerto Madero Chiapas

Opción 1. Dragado del canal a 10 m
Prolongación rompeolas oriente 732 m

Periodo T = 15.7 segundos
(Inclinación 45°)

Sección		Z m	Altura Ola , m Dirección del oleaje				Long. Ola m
			W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	0.8	0.46	0.19	0.13	151.17
	Talud	6	0.82	0.56	0.23	0.13	118.39
	Berma	2	0.96	0.58	0.24	0.14	69.26
0 + 400	Eje canal	10	1.84	1.13	0.5	0.23	151.17
	Talud	6	2.11	1.22	0.59	0.23	118.39
	Berma	3	2.43	1.53	0.73	0.36	84.57
Ampliación Canal	Eje canal	10	3.03	1.56	0.56	0.33	151.17
	Talud	8.25	3.04	1.67	0.64	0.35	137.97
	Berma	8.5	4.34	2.38	1.07	0.52	140.14

Donde Z es la profundidad.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.3 b) Datos del estudio de refracción de oleaje.

Puerto Madero Chiapas

Opción 1. Dragado del canal a 10 m

Prolongación rompeolas oriente 732 m

Periodo T = 14.3 segundos

(Inclinación 45°)

Sección		Z m	Altura Ola Dirección del oleaje				Long. Ola m
			W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	0.78	0.57	0.19	0.11	138.9
	Talud	6	0.92	0.54	0.22	0.11	107.47
	Berma	2	0.94	0.58	0.22	0.13	83.01
0 + 400	Eje canal	10	1.84	1.1	0.42	0.19	138.9
	Talud	6	1.92	1.18	0.45	0.19	107.47
	Berma	3	2.42	1.58	0.48	0.3	78.73
Ampliación Canal	Eje canal	10	2.93	1.8	0.58	0.27	138.9
	Talud	8.25	3.03	1.88	0.63	0.3	125.08
	Berma	8.5	4.53	2.28	1.19	0.54	126.85

Donde Z es la profundidad.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.3 c) Datos del estudio de refracción de oleaje

Puerto Madero Chiapas

Opción 2. Dragado del canal a 10 m

Prolongación rompeolas oriente 732 m

Periodo T = 15.7 segundos
(Línea recta)

Sección		Z m	Altura Ola				Long. Ola m
			Dirección del oleaje				
			W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	3.48	4.39	2.94	1.71	151.17
	Talud	6	0.37	0.42	0.29	0.23	118.39
	Berma	2	0.76	0.9	0.75	0.63	69.26
0 + 400	Eje canal	10	3.61	4.51	3.05	1.98	151.17
	Talud	6	2.42	2.69	2.28	1.92	118.39
	Berma	3	2.72	3.05	2.62	2.23	84.57
Ampliación Canal	Eje canal	10	4.96	5.72	4.67	4.03	151.17
	Talud	8.25	5.22	5.51	5.1	4.65	137.97
	Berma	8.5	5.42	5.94	5.43	4.91	140.14

Donde Z es la profundidad.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.3 d) Datos del estudio de refracción de oleaje

Puerto Madero Chiapas

Opción 2. Dragado del canal a 10 m

Prolongación rompeolas oriente 732 m

Periodo T = 14.3 segundos

(Línea recta)

Sección		Z m	Altura Ola Dirección del oleaje				Long. Ola m
			W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	3.15	3.99	2.65	1.69	136.9
	Talud	6	0.35	0.38	0.26	0.21	107.47
	Berma	2	0.78	0.85	0.56	0.54	63.01
0 + 400	Eje canal	10	3.28	4.1	2.75	1.78	136.9
	Talud	6	1.31	2.54	2.14	1.78	107.47
	Berma	3	2.53	2.87	2.46	2.07	76.73
Ampliación Canal	Eje canal	10	4.59	5.27	4.36	3.74	136.9
	Talud	8.25	4.87	5.18	4.83	4.32	125.08
	Berma	8.5	5.19	5.67	5.17	4.47	126.85

Donde Z es la profundidad.



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.3 e) Datos del estudio de refracción de oleaje

Puerto Madero Chiapas

Opción 1. Dragado del canal a 10 m

Condiciones actuales

Periodo T = 15.7 segundos

Seccion		Z m	Altura Ola Dirección del oleaje				Long. Ola m
			W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	1.58	0.91	0.88	0.85	136.9
	Talud	6	1.84	2.10	2.14	2.09	107.47
	Berma	2	1.85	2.00	1.98	1.94	63.01
0 + 400	Eje canal	10	3.80	3.88	3.68	3.52	136.9
	Talud	6	4.24	4.09	3.76	3.55	107.47
	Berma	3	4.18	4.13	3.83	3.59	76.73
Ampliacion Canal	Eje canal	10	6.19	6.66	6.43	6.11	136.9
	Talud	8.25	6.62	6.91	6.55	6.18	125.08
	Berma	8.5	6.64	6.75	6.20	6.00	126.85

Donde Z es la profundidad.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.3 f) Datos del estudio de refracción de oleaje

Puerto Madero Chiapas

Opción 2. Dragado del canal a 10 m

Condiciones actuales

Periodo T = 14.3 segundos

Seccion		Z m	Altura Ola Dirección del oleaje				Long. Ola m
			W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	0.82	0.77	0.88	0.80	136.9
	Talud	6	1.82	1.97	2.07	1.99	107.47
	Berma	2	1.88	1.88	1.92	1.84	63.01
0 + 400	Eje canal	10	3.72	3.50	3.5	3.28	136.9
	Talud	6	4.08	3.90	3.58	3.28	107.47
	Berma	3	3.94	3.78	3.59	3.28	76.73
Ampliacion Canal	Eje canal	10	5.70	6.19	5.98	5.59	136.9
	Talud	8.25	6.12	6.44	6.08	5.59	125.08
	Berma	8.5	5.90	6.30	5.75	5.28	126.85

Donde Z es la profundidad



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

2.5 Influencia de las corrientes marinas

2.5.1 Análisis de la susceptibilidad a la licuación por oleaje de los depósitos de suelo

2.5.1.1 Determinación de la presión debida al oleaje

Para determinar la fuerza generada por efecto del oleaje se utilizará la ecuación 1.11.

$$P_o = \gamma_w \frac{H}{2} \left[\frac{1}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \right] \quad (1.11)$$

Donde:

P_o = amplitud de la presión

H = altura de la ola en m

γ_w = peso específico del agua de mar = $1.025 \text{ ton/m}^3 = 10.25 \text{ kN/m}^3$

h = profundidad del agua en m

L = longitud de la ola a la profundidad del canal, talud o berma para un periodo de oleaje de 15.7 y 14.3 segundos que correspondientes a la altura de ola máxima

A close-up photograph of a water splash, showing a large, dark, circular droplet in the center, surrounded by smaller, lighter droplets and a white, frothy rim. The background is a deep blue color.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

2.5.1.2 Determinación del esfuerzo cortante inducido por el oleaje

En este punto se utilizará la ecuación 2.31.

$$\tau_{vh} = 3.25P_oZ/L \quad (1.31)$$

Donde:

τ_{vh} = esfuerzo cortante inducido por el oleaje

P_o = presión debida al oleaje

Z = profundidad

L = longitud de la ola

2.5.1.3 Determinación del esfuerzo cortante cíclico máximo antes de que se produzca la licuación por oleaje

Corrección del número de golpes en la prueba de penetración estándar.

$$N' = C_v N_f \quad (2.2)$$



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Donde:

- C_n factor de corrección
- N_f número de golpes, SPT
- N' número de golpes corregido, SPT

El factor de corrección C_n se determina como sigue:

$$C_n = (1 / \sigma')^{1/2} \quad (2.3)$$

Donde:

σ' está expresada en ton/ft²

El esfuerzo cortante cíclico que causa la licuación puede determinarse con la ecuación 2.34.

$$\tau_r = 0.009 N' \sigma'_v \quad (1.34)$$



Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

2.5.1.4 Determinación del factor de seguridad contra licuación por oleaje.

El factor de seguridad se determina con la siguiente relación:

$$F.S = \frac{\tau_f}{\tau_{vh}} \quad (2.5)$$

Para la determinación de los factores de seguridad, F.S, se consideran las tres propuestas siguientes:

- a) Opción 1. Prolongación de la escollera en 732 m, con inclinación de 45°.
- b) Opción 2. Prolongación de la escollera en 732 m, en línea recta.
- c) Opción 3. Condiciones actuales.

En las diferentes opciones se consideran las alturas de ola máxima que se puede presentar tomando en cuenta periodos de retorno de 50 años, y periodos de 15.7 y 14.3 segundos para condiciones de oleaje, considerando una profundidad de dragado de 10.00 m. Los resultados obtenidos de presión y esfuerzo cortante inducidos por el oleaje así como los factores de seguridad se presentan en las Tablas 2.8.

Los factores de seguridad obtenidos muestran valores muy favorables para cuando se analiza el oleaje en las direcciones sur y sureste. Los problemas se pueden presentar para oleajes fuertes en las direcciones suroeste y en particular para la dirección oeste, pues es la que presenta factores de seguridad más bajos.

Las características y resultados obtenidos de los materiales estudiados de los sondeos indican que el lugar es seguro y no se presentarán problemas de inestabilidad debido a la licuación por oleaje.

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.8 a) Resultados del factor de seguridad contra licuación por oleaje

PUERTO MADERO CHIAPAS

OPCION 1 DRAGADO DEL CANAL A -10 M

PERIODO T = 15.7 SEGUNDOS

PROLONGACION ROMPEOLAS ORIENTE 732 M

(INCLINACION 45 °)

Seccion	Z m	Long. Ola m	Z/L < 0,1	P _o kN/m ²				τ _{sh} kN/m ²				N'	σ' kN/m ²	τ _c kN/m ²	F.S				
				W	SW	S	SE	W	SW	S	SE				W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	151,17	0,07	2,83	2,17	0,90	0,61	0,61	0,47	0,19	0,13	36,31	124,11	40,56	66,73	87,03	210,71	307,96
	Talud	6	118,39	0,05	4,49	2,73	1,12	0,63	0,74	0,45	0,18	0,10	52,38	86,62	40,83	55,27	90,80	221,08	391,13
	Berma	2	69,26	0,03	4,84	2,92	1,21	0,71	0,45	0,27	0,11	0,07	41,89	38,33	14,45	31,81	52,66	127,25	218,15
0 + 400	Eje canal	10	151,17	0,07	8,67	5,32	2,36	1,08	1,86	1,14	0,51	0,23	36,31	124,11	40,56	21,76	35,43	80,07	174,07
	Talud	6	118,39	0,05	10,29	5,95	2,88	1,12	1,69	0,98	0,47	0,18	52,38	86,62	40,83	24,10	41,68	86,18	221,08
	Berma	3	84,57	0,04	12,15	7,65	3,65	1,80	1,40	0,88	0,42	0,21	69,84	52,97	33,29	23,77	37,75	79,12	160,43
Ampilación canal	Eje canal	10	151,17	0,07	14,28	7,35	2,64	1,55	3,07	1,58	0,57	0,33	36,31	124,11	40,56	13,21	25,66	71,49	121,32
	Talud	8,25	137,97	0,06	14,54	7,99	3,06	1,67	2,83	1,55	0,59	0,33	40,36	105,71	38,40	13,59	24,73	64,54	118,02
	Berma	8,5	140,14	0,06	20,72	11,36	5,11	2,48	4,08	2,24	1,01	0,49	35,36	111,53	35,49	8,69	15,85	35,25	72,53

Donde:

Z Profundidad

P_o Presión debida al oleaje

τ_{sh} Esfuerzo cortante inducido por el oleaje

N' Número de golpes corregido

σ' Esfuerzo efectivo

τ_c Esfuerzo cíclico antes de producirse la licuación

F.S Factor de seguridad

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.8 b) Resultados del factor de seguridad contra licuación por oleaje

PUERTO MADERO CHIAPAS

OPCION 1 DRAGADO DEL CANAL A -10 M

PERIODO T = 14.3 SEGUNDOS

PROLONGACION ROMPEOLAS ORIENTE 732 M

(INCLINACION 45 °)

Seccion	Z m	Long. Ola m	Z/L < 0,1	P _o kN/m ²				τ _{vh} kN/m ²				N'	σ' kN/m ²	τ _c kN/m ²	F.S				
				W	SW	S	SE	W	SW	S	SE				W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	136,9	0,07	3,52	2,64	0,88	0,51	0,84	0,63	0,21	0,12	36,31	124,11	40,56	48,56	64,75	194,25	335,53
	Talud	6	107,47	0,06	4,44	2,61	1,06	0,53	0,81	0,47	0,19	0,10	52,38	86,62	40,83	50,70	86,37	212,01	424,02
	Berma	2	63,01	0,03	4,72	2,81	1,11	0,65	0,49	0,29	0,11	0,07	41,89	38,33	14,45	29,66	49,78	126,72	214,45
0 + 400	Eje canal	10	136,9	0,07	8,52	5,09	1,94	0,88	2,02	1,21	0,46	0,21	36,31	124,11	40,56	20,06	33,55	87,88	194,25
	Talud	6	107,47	0,06	9,26	5,69	2,17	0,92	1,68	1,03	0,39	0,17	52,38	86,62	40,83	24,29	39,53	103,65	245,48
	Berma	3	76,73	0,04	12,04	7,76	2,39	1,49	1,53	0,99	0,30	0,19	69,84	52,97	33,29	21,77	33,77	109,74	175,59
Ampliación canal	Eje canal	10	136,9	0,07	13,56	7,41	2,68	1,25	3,22	1,76	0,64	0,30	36,31	124,11	40,56	12,60	23,07	63,63	136,70
	Talud	8,25	125,08	0,07	14,28	7,92	2,97	1,41	3,06	1,70	0,64	0,30	40,36	105,71	38,40	12,54	22,62	60,31	126,65
	Berma	8,5	126,85	0,07	21,30	10,72	5,60	2,54	4,64	2,33	1,22	0,55	35,36	111,53	35,49	7,65	15,20	29,13	64,19

Donde:

Z Profundidad

P_o Presión debida al oleaje

τ_{vh} Esfuerzo cortante inducido por el oleaje

N' Número de golpes corregido

σ' Esfuerzo efectivo

τ_c Esfuerzo cíclico antes de producirse la licuación

F.S Factor de seguridad

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.8 c) Resultados del factor de seguridad contra licuación por oleaje

PUERTO MADERO CHIAPAS

OPCION 2 DRAGADO DEL CANAL A -10 M

PERIODO T = 15.7 SEGUNDOS

PROLONGACION ROMPEOLAS ORIENTE 732 M

(LINEA RECTA)

Seccion	Z m	Long. Ola m	Z/L < 0,1	P _o kN/m ²				τ _{vh} kN/m ²				N'	σ' kN/m ²	τ _i kN/m ²	F.S				
				W	SW	S	SE	W	SW	S	SE				W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	151,17	0,07	16,40	20,69	13,85	8,06	3,53	4,45	2,98	1,73	36,31	124,11	40,56	11,50	9,12	13,62	23,41
	Talud	6	118,39	0,05	1,80	2,05	1,41	1,12	0,30	0,34	0,23	0,18	52,38	86,62	40,83	137,43	121,07	175,34	221,08
	Berma	2	69,26	0,03	3,83	4,54	3,78	3,18	0,36	0,43	0,35	0,30	41,89	38,33	14,45	40,18	33,93	40,72	48,48
0 + 400	Eje canal	10	151,17	0,07	17,01	21,25	14,37	9,33	3,66	4,57	3,09	2,01	36,31	124,11	40,56	11,09	8,88	13,13	20,22
	Talud	6	118,39	0,05	11,80	13,12	11,12	9,36	1,94	2,16	1,83	1,54	52,38	86,62	40,83	21,01	18,90	22,30	26,48
	Berma	3	84,57	0,04	13,60	15,25	13,10	11,15	1,57	1,76	1,51	1,29	69,84	52,97	33,29	21,23	18,94	22,04	25,90
Ampilación canal	Eje canal	10	151,17	0,07	23,37	26,95	22,01	18,99	5,02	5,79	4,73	4,08	36,31	124,11	40,56	8,07	7,00	8,57	9,93
	Talud	8,25	137,97	0,06	24,97	26,36	24,40	22,24	4,85	5,12	4,74	4,32	40,36	105,71	38,40	7,91	7,50	8,10	8,88
	Berma	8,5	140,14	0,06	25,88	28,36	25,92	23,44	5,10	5,59	5,11	4,62	35,36	111,53	35,49	6,96	6,35	6,95	7,68

Donde:

Z Profundidad

P_o Presión debida al oleaje

τ_{vh} Esfuerzo cortante inducido por el oleaje

N' Número de golpes corregido

σ' Esfuerzo efectivo

τ_i Esfuerzo cíclico antes de producirse la licuación

F.S Factor de seguridad

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.8 d) Resultados del factor de seguridad contra licuación por oleaje

PUERTO MADERO CHIAPAS

OPCION 2 DRAGADO DEL CANAL A -10 M

PERIODO T = 14.3 SEGUNDOS

PROLONGACION ROMPEOLAS ORIENTE 732 M

(LINEA RECTA)

Seccion	Z m	Long. Ola m	Z/L < 0,1	P _o kN/m ²				τ _{vh} kN/m ²				N'	σ' kN/m ²	τ _c kN/m ²	F.S				
				W	SW	S	SE	W	SW	S	SE				W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	136,9	0,07	14,58	18,47	12,27	7,82	3,46	4,38	2,91	1,86	36,31	124,11	40,56	11,72	9,25	13,93	21,84
	Talud	6	107,47	0,06	1,69	1,83	1,25	1,01	0,31	0,33	0,23	0,18	52,38	86,62	40,83	133,26	122,74	179,39	222,10
	Berma	2	63,01	0,03	3,82	4,27	2,81	2,71	0,39	0,44	0,29	0,28	41,89	38,33	14,45	36,68	32,80	49,78	51,63
0 + 400	Eje canal	10	136,9	0,07	15,09	18,98	12,73	8,15	3,58	4,51	3,02	1,93	36,31	124,11	40,56	11,32	9,00	13,42	20,97
	Talud	6	107,47	0,06	6,32	12,26	10,33	8,59	1,15	2,22	1,87	1,56	52,38	86,62	40,83	35,60	18,36	21,80	26,20
	Berma	3	76,73	0,04	12,58	14,28	12,24	10,30	1,60	1,81	1,55	1,31	69,84	52,97	33,29	20,82	18,35	21,41	25,45
Ampliación canal	Eje canal	10	136,9	0,07	21,25	24,39	20,18	17,31	5,04	5,79	4,79	4,11	36,31	124,11	40,56	8,04	7,00	8,47	9,87
	Talud	8,25	125,08	0,07	22,96	24,42	22,77	20,37	4,92	5,23	4,88	4,37	40,36	105,71	38,40	7,80	7,34	7,87	8,80
	Berma	8,5	126,85	0,07	24,40	26,66	24,31	21,02	5,31	5,81	5,29	4,58	35,36	111,53	35,49	6,68	6,11	6,70	7,75

Donde:

Z Profundidad

P_o Presión debida al oleaje

τ_{vh} Esfuerzo cortante inducido por el oleaje

N' Número de golpes corregido

σ' Esfuerzo efectivo

τ_c Esfuerzo cíclico antes de producirse la licuación

F.S Factor de seguridad

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.8 e) Resultados del factor de seguridad contra licuación por oleaje

PUERTO MADERO CHIAPAS

DRAGADO DEL CANAL A 10 M DE PROF.

PERIODO T = 15.7 SEGUNDOS

CONDICIONES ACTUALES

Sección	Z m	Long. Ola m	Z/L < 0,1	P_o kN/m ²				τ_{vh} kN/m ²				N'	σ' kN/m ²	τ kN/m ²	F.S				
				W	SW	S	SE	W	SW	S	SE				W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	151,17	0,07	7,22	4,21	4,07	3,93	1,55	0,91	0,88	0,85	36,31	124,11	40,56	26,13	44,79	46,31	47,95
	Talud	6	118,39	0,05	8,88	10,13	10,33	10,08	1,46	1,67	1,70	1,66	52,38	86,62	40,83	27,92	24,47	24,01	24,58
	Berma	2	69,26	0,03	9,30	10,05	9,95	9,75	0,87	0,94	0,93	0,91	41,89	38,33	14,45	16,56	15,32	15,48	15,80
0 + 400	Eje canal	10	151,17	0,07	17,59	17,96	17,03	16,29	3,78	3,86	3,66	3,50	36,31	124,11	40,56	10,73	10,50	11,07	11,58
	Talud	6	118,39	0,05	20,46	19,73	18,14	17,13	3,37	3,25	2,99	2,82	52,38	86,62	40,83	12,12	12,56	13,67	14,47
	Berma	3	84,57	0,04	20,79	20,54	19,05	17,86	2,40	2,37	2,20	2,06	69,84	52,97	33,29	13,89	14,06	15,16	16,17
Ampliación canal	Eje canal	10	151,17	0,07	28,65	30,83	29,76	28,28	6,16	6,63	6,40	6,08	36,31	124,11	40,56	6,58	6,12	6,34	6,67
	Talud	8,25	137,97	0,06	31,21	32,58	30,88	29,13	6,06	6,33	6,00	5,66	40,36	105,71	38,40	6,33	6,07	6,40	6,78
	Berma	8,5	140,14	0,06	31,22	31,74	29,15	28,21	6,15	6,26	5,75	5,56	35,36	111,53	35,49	5,77	5,67	6,18	6,38

Donde:

Z Profundidad

P_o Presión debida al oleaje

τ_{vh} Esfuerzo cortante inducido por el oleaje

N' Número de golpes corregido

σ' Esfuerzo efectivo

τ_c Esfuerzo cíclico antes de producirse la licuación

F.S Factor de seguridad

Evaluación Simplificada de Licuación inducida por oleaje

Tabla 2.8 f) Resultados del factor de seguridad contra licuación por oleaje

PUERTO MADERO CHIAPAS

DRAGADO DEL CANAL A 10 M DE PROF.

PERIODO T = 14.3 SEGUNDOS

CONDICIONES ACTUALES

Seccion	Z m	Long. Ola m	Z/L < 0,1	P _o kN/m ²				τ _{vh} kN/m ²				N'	σ' kN/m ²	τ _c kN/m ²	F.S				
				W	SW	S	SE	W	SW	S	SE				W	SW	S	SE	
H	Eje canal	10	136,9	0,07	3,80	3,56	3,98	3,70	0,90	0,85	0,95	0,88	36,31	124,11	40,56	45,01	47,93	42,92	46,14
	Talud	6	107,47	0,06	8,78	9,51	9,99	9,60	1,59	1,72	1,81	1,74	52,38	86,62	40,83	25,63	23,68	22,53	23,44
	Berma	2	63,01	0,03	9,35	9,35	9,65	9,25	0,96	0,96	1,00	0,95	41,89	38,33	14,45	14,99	14,99	14,52	15,15
0 + 400	Eje canal	10	136,9	0,07	17,22	16,20	16,20	15,18	4,09	3,85	3,85	3,60	36,31	124,11	40,56	9,92	10,55	10,55	11,25
	Talud	6	107,47	0,06	19,69	18,82	17,18	15,83	3,57	3,41	3,12	2,87	52,38	86,62	40,83	11,43	11,96	13,10	14,22
	Berma	3	76,73	0,04	19,60	18,80	17,86	16,32	2,49	2,39	2,27	2,07	69,84	52,97	33,29	13,37	13,94	14,67	16,06
Ampliación canal	Eje canal	10	136,9	0,07	26,38	28,65	27,68	25,88	6,26	6,80	6,57	6,14	36,31	124,11	40,56	6,48	5,96	6,17	6,60
	Talud	8,25	125,08	0,07	28,85	30,36	28,66	26,35	6,18	6,51	6,14	5,65	40,36	105,71	38,40	6,21	5,90	6,25	6,80
	Berma	8,5	126,85	0,07	27,74	29,62	27,04	24,73	6,04	6,45	5,89	5,39	35,36	111,53	35,49	5,87	5,50	6,03	6,59

Donde:

Z Profundidad

P_o Presión debida al oleaje

τ_{vh} Esfuerzo cortante inducido por el oleaje

N' Número de golpes corregido

σ' Esfuerzo efectivo

τ_c Esfuerzo cíclico antes de producirse la licuación

F.S Factor de seguridad.

“Vi un cielo nuevo y una tierra nueva; porque el primer cielo y la primera tierra pasaron, y el mar ya no existía más.” Ap.21:1

