

# **ANEXOS**



## ANEXO A

### PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR EL POTENCIAL A LA LICUEFACCIÓN EN DEPÓSITOS GRANULARES

El procedimiento consiste en comparar la resistencia cíclica promedio a la licuefacción del depósito con la carga cíclica promedio impuesta por el sismo. La metodología utiliza los resultados de la prueba de penetración estándar SPT para evaluar la resistencia cíclica promedio del depósito a la licuefacción. Sin embargo, existe una metodología más reciente que utiliza los resultados de la prueba de penetración de cono CPT (Stark and Olson, 1995).

#### ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA CÍCLICA PROMEDIO DEL DEPÓSITO A LA LICUEFACCIÓN

##### Metodología con la prueba de penetración estándar (SPT)

Para determinar la resistencia cíclica promedio del depósito con los resultados de la prueba de penetración estándar SPT, el número de golpes  $N$  obtenido en esa prueba debe ser corregido por esfuerzo efectivo de sobrecarga, contenido de finos y eficiencia en la ejecución del ensayo. Debido a que el valor de  $N$  para un determinado depósito está en función del esfuerzo efectivo de sobrecarga, el valor medido de  $N$  se convierte a un valor de presión de sobrecarga estándar  $N_1$  mediante la siguiente expresión propuesta por Liao y Whitman (1985):

$$N_1 = N \cdot \left( \frac{100}{\sigma_{v0}} \right)^{1/2}$$

En la ecuación,  $N$  representa el número de golpes medidos en la prueba de penetración estándar,  $\sigma_{v0}$  es el esfuerzo efectivo en Pa a la profundidad donde se midió  $N$  y  $N_1$  es el número de golpes a una presión de sobrecarga estándar.

Adicionalmente, los valores de  $N$  medidos en la prueba de penetración estándar SPT necesitan ser corregidos por eficiencia. La energía que efectivamente imparte el martillo durante la ejecución de la prueba de penetración estándar usualmente difiere en diferentes partes del mundo y la misma varía entre 40% y 90% de la energía teórica (Schmertmann, 1976). Para evaluar el potencial de licuefacción se seleccionó el 60% como el valor estándar y el mismo se designa como  $N_{60}$ . Por lo tanto, cuando el valor de  $N$  se determina impartiendo una energía diferente de 60%, la misma debe ser convertida al valor estándar mediante la expresión:

$$N_{60} = N \cdot \left( \frac{E}{60} \right)$$

Donde E representa la eficiencia usada en la determinación de N. El cuadro A.1 presenta valores de eficiencia en la prueba de penetración estándar de varios países.

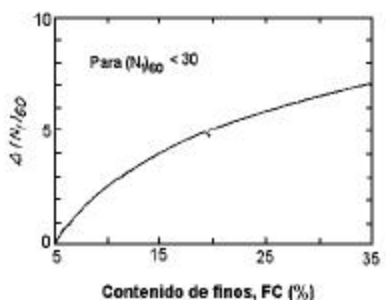
**Cuadro A.1**

País	Eficiencia E
Argentina	0,45
China	0,50
Colombia	0,50
Japón	0,66
USA	0,60
Venezuela	0,43

Fuente: De Coduto, 1994

El valor del número de golpes corregido por eficiencia y esfuerzo efectivo de sobrecarga se denota como  $(N_1)_{60}$ . Este valor representa una medida de la densidad relativa del depósito o resistencia promedio a la licuefacción de arenas limpias con contenido de finos pasante del tamiz No. 200, menor de 5%.

Cuando el contenido de finos es mayor de 5%, el valor de  $(N_1)_{60}$  debe ser corregido. Esto se debe a que el grado de drenaje durante la SPT disminuye con el incremento del contenido de finos, por lo tanto, el número de golpes medido durante el ensayo subestima la resistencia a la licuefacción en las arenas limosas. Por ello, el valor de  $(N_1)_{60}$  debe ser incrementado en la cantidad  $\Delta(N_1)_{60}$  dada en la figura A.1.



**Figura A.1**

**Corrección por finos para la prueba de penetración estándar**

## ESTIMACIÓN DEL ESFUERZO SÍSMICO IMPUESTO POR EL SISMO

La magnitud del esfuerzo cíclico promedio impuesto por el sismo se puede estimar con el procedimiento simplificado propuesto por Seed e Idriss (1982), según la siguiente expresión:

$$\frac{t_{(sismo)}}{s'_{vo}} = 0,65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{s_{vo}}{s'_{vo}} \cdot r_d$$

donde:

- $\tau_{(sismo)}$  = Esfuerzo de corte cíclico promedio impuesto por el sismo.
- $a_{max}$  = Máxima aceleración del sismo impuesta en la superficie del terreno.
- $g$  = Aceleración de la gravedad.
- $r_d$  = Coeficiente de reducción de esfuerzos, el cual puede ser evaluado como:  
 $r_d = 1 - 0.01 z$  (z es la profundidad en metros).
- $s_{vo}$  = Esfuerzo total a la profundidad donde se evalúa el potencial.
- $s'_{vo}$  = Esfuerzo efectivo a la profundidad donde se evalúa el potencial.

## EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN

### Metodología con la prueba de penetración estándar SPT

Una vez calculados los valores de  $(N_1)_{60}$  (incluida la corrección por finos) y el esfuerzo cíclico promedio impuesto por el sismo, estos valores son ploteados como abcisas y ordenadas, respectivamente. Los puntos cuyas coordenadas estén en la parte superior de la línea divisoria representarán depósitos susceptibles de sufrir licuefacción, mientras que los puntos cuyas coordenadas estén en la parte inferior de la línea divisoria representarán depósitos donde se espera que no se produzca licuefacción.

La línea sólida en la figura A.2 representa la línea divisoria entre los casos donde se observó licuefacción y los casos donde no se observó licuefacción en sismos de magnitud 7.5, cuya energía genera usualmente unos 15 ciclos representativos de carga. La ecuación de la línea sólida en la figura A.2 viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{t}{s'_{vo}} = 0,011 \cdot [(N_1)_{60}]$$

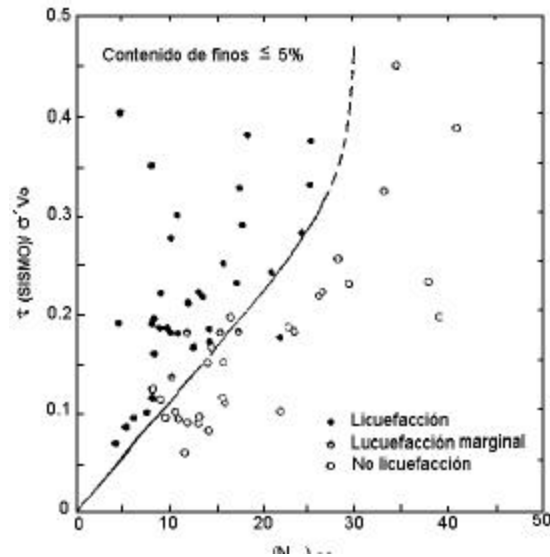
donde:

- $t$  = Esfuerzo de corte cíclico promedio requerido para causar licuefacción.
- $(N_1)_{60}$  = Valor del número de golpes de la prueba de penetración estándar debidamente corregido por esfuerzo de sobrecarga, eficiencia y finos.

Como puede apreciarse en la figura A.2 y su respectiva ecuación, es sólo válida para valores de  $(N_1)_{60}$  menores de 20 golpes.

Para sismos de diferente magnitud, el número de ciclos representativos de carga varía y por consiguiente el esfuerzo de corte cíclico promedio también varía. Por lo tanto, la línea sólida en la figura A.2 debe ser modificada para sismos de diferentes magnitudes. Seed e Idriss (1982)

desarrollaron un factor de corrección  $C_n$  para ajustar la línea sólida de la figura A.2 o la ecuación . Este factor de corrección aparece en el cuadro A.2.



**Figura A.2**  
**Criterio de licuefacción**

**Cuadro A.2**  
**Factor de corrección según la magnitud del sismo**

Magnitud del sismo	$C_n$
8,5	0,89
7,5	1,0
6,75	1,13
6	1,32
5,25	1,5

Las ordenadas de línea sólida de la figura A.2. deben multiplicarse por el factor de corrección  $C_n$  correspondiente a la magnitud del sismo considerado para generar una nueva línea divisoria que servirá como limite entre licuefacción y no-licuefacción para un sismo de esa magnitud.

#### **Ejemplo de evaluación del potencial de licuefacción**

Se estima que un sismo de magnitud 7,5 generará una aceleración de 0,15 g en un depósito de arena uniforme ( $C_u = 3$ ) fina y relativamente limpia (contenido de finos menor de 5 %) ubicado a cierta distancia del epicentro. Se determinó que el nivel freático se encuentra a un metro de profundidad. Se realizó una prueba de penetración estándar (SPT) con 60% de eficiencia y se determinó que el número de golpes  $N$  a 7 m de profundidad es de 12 golpes. Se desea evaluar la susceptibilidad a la licuefacción del deposito a dicha profundidad.

## Solución

- a) Se calcula el esfuerzo total y el esfuerzo efectivo a 7 m de profundidad

$$\sigma_{vo} = 19 \text{ KN/m}^3 \cdot 7 \text{ m} = 133 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - U = 133 \text{ kPa} - 6 \text{ m} \cdot 9.81 \text{ KN/m}^3 = 74.14 \text{ kPa}$$

- b) El valor medido de N se convierte a un valor de presión de sobrecarga estándar  $(N_1)_{60}$ . Debido a que se usó una eficiencia de 60 % en la prueba de penetración estándar (SPT), el factor de corrección por eficiencia es la unidad, mientras que la corrección por presión de sobrecarga se determina según la ecuación.

Este valor de  $N = (N_1)_{60} = 12$  será usado como abcisa en la figura A.2. No es necesario hacer la corrección por finos ya que el mismo es menor de 5%.

- c) La carga cíclica promedio inducida por el sismo se estima según la ecuación.

$$\frac{\tau_{(sismo)}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \cdot r_d$$

la cual resulta en 0,16

Este valor será usado como ordenada en la figura A.2

- d) Se plotean los valores de  $(N_1)_{60}$ ; en la figura A.2 este punto se ubica en la parte superior de la línea divisoria y, por lo tanto, habrá licuefacción en caso de un evento sísmico como el descrito.