

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN BASADO EN EL ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO

Jorge Soto Huamán

e-mail: josotoh@uni.pe

Dinámica de Suelos

Profesor: MSc. Ing. Denys Parra Murrugarra

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

RESUMEN:

Este trabajo describe los métodos de evaluación de potencial de licuación a partir del ensayo triaxial cíclico de suelos arenosos. Estos métodos realizan las correcciones más relevantes como la condición de esfuerzos *in situ*, movimiento del sismo multidireccional, irregularidades de la forma de onda del esfuerzo cortante y magnitud del sismo. La evaluación del esfuerzo cortante cíclico inducido por el sismo es realizado mediante el software Edushake. Se realizó una aplicación a partir de los datos de campo y laboratorio obtenidos en la localidad de Tambo de Mora, a partir de cuyos resultados se concluye que el método de Annaki & Lee es el que mejor resultados proporciona, por ser estos muy próximos a los obtenidos con el método simplificado del NCEER, que es el que actualmente rige la forma de realizar este tipo de análisis del potencial de licuación de suelos.

ABSTRACT:

This paper describes liquefaction potential assessment methods based on cyclic triaxial test of sandy soils. These methods perform the most relevant correlations such as *in situ* stress conditions, multidirectional earthquake motion, shear stress irregular waveform and earthquake magnitude. The assessment of cyclic shear stress induced by earthquake is performed by software Edushake. An application was performed based on the field and laboratory data obtained in Tambo de Mora site, from those results it is concluded that the Annaki & Lee method is which provides the best results, as these are very close to those obtained with NCEER simplified method, which is currently governs the way to perform this type of analysis of soil liquefaction potential.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de licuación se refiere a la pérdida de resistencia en suelos granulares sin cohesión debido al incremento de la presión de poros durante la aplicación de una carga monotónica o dinámica, siendo esta última usada en las pruebas triaxiales cíclicas.

Los factores que influyen en el potencial de licuación (Seed & Idriss, 1971) son los siguientes: tipo de suelo, densidad relativa o relación de vacíos, presión de confinamiento inicial, intensidad del movimiento del terreno y duración de movimiento del terreno.

Para nuestro propósito, la resistencia a la licuación del suelo es evaluada a partir de los resultados del ensayo triaxial cíclico. En este método, el potencial de licuación se evalúa por comparación de la resistencia a la licuación de un suelo (τ_r) con el esfuerzo cortante cíclico generado durante un sismo (τ_e), a partir del procedimiento propuesto por Seed et al. (1971)

El esfuerzo cortante inducido por el sismo se representa por un valor promedio que equivale al 65% del esfuerzo cortante máximo en cada estrato.

La evaluación del potencial de licuación a partir de ensayos triaxiales cíclicos consiste básicamente en lo siguiente:

- a) Cálculo de la relación del esfuerzo cíclico inducido por el sismo dentro de cada capa de suelo a partir de un análisis de respuesta sísmica (CSR).
- b) Realizar ensayos triaxiales cíclicos de licuación en muestras representativas y determinar la resistencia a la licuación, es decir la curva de resistencia cíclica (CRR).
- c) Corregir la resistencia a la licuación y los esfuerzos de corte obtenidos de a y b, para convertirlos en equivalentes *in situ* dentro en cada estrato durante el sismo.

- d) Realizar la evaluación por comparación entre la resistencia a la licuación cíclica (CRR) y los esfuerzos cortantes *in situ* (CSR)

Las siguientes son las correcciones se se aplican a la resistencia cíclica del suelo:

Correcciones por condición de esfuerzos *in situ*. El ensayo triaxial cíclico es realizado en condiciones de esfuerzos isotrópicos. Sin embargo, el suelo está consolidado en la condición de K_0 . Cuando se multiplicado por $(1+2K_0)/3$ al valor de CRR, la resistencia a la licuación corresponde a las condiciones de esfuerzo *in situ* en el perfil de suelo.

Correcciones por movimiento del sismo multidireccional. El ensayo triaxial es aplicado en una sola dirección; sin embargo, el movimiento del sismo cambia constantemente la dirección del corte, por lo que la resistencia es reducida por cortante multidireccional. El factor de reducción es aproximadamente de 0.90, según los estudios de laboratorio.

Correcciones por irregularidades en la forma de la onda. En el análisis dinámico de los esfuerzos de corte generados en el suelo, se observa la forma irregular del movimiento sísmico. Aplicar un esfuerzo cortante similar al que induce un sismo en cada estrato de suelo es difícil y complicado en la actualidad en los ensayos cíclicos.

Los resultados de ensayos de corte por torsión por **Ishihara** indican que la forma de la onda no tiene mucha influencia sobre la presión de poros de generada si el esfuerzo de corte dinámico es el mismo. Para uso práctico la forma de la onda del esfuerzo cortante puede ser clasificada, para la evaluación del potencial de licuación, como del tipo de impacto o vibración.

Entonces el factor de corrección C_k , depende del tipo de onda como se ha mencionado. $C_k=0.55$ para un movimiento tipo impacto y $C_k=0.70$ para un movimiento tipo vibración. La Tabla 1 resume la forma de la onda, además en la Figura 1 se indica el esquema del tipo de onda.

Tabla 1. Clasificación de la forma de la onda y el coeficiente de conversión

Patrón forma de onda	Definición	Coefficiente de conversión C_k
Tipo impacto	Los casos donde a lo más sólo 2 picos tienen una amplitud de mayor de $60\% \tau_{m\acute{a}x}$.	0.55
Tipo vibración	Los casos donde 3 o más picos tienen una amplitud sobre de $60\% \tau_{m\acute{a}x}$.	0.70

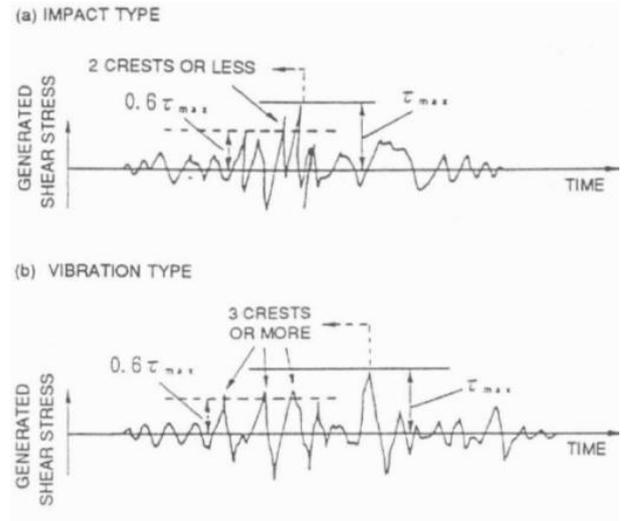


Figura 1. Clasificación del patrón de tipo de la forma de onda por Ishihara.

1. MÉTODOS DE EVALUACIÓN

1.1 Método propuesto por Seed et. al

Esfuerzos cortantes cíclicos durante el sismo. Las formas de onda del esfuerzo cortante cíclico generado en cada estrato durante el sismo es obtenido a partir del *análisis de respuesta sísmica*. A partir del valor máximo ($\tau_{dm\acute{a}x}$) del esfuerzo cortante cíclico, el esfuerzo cortante cíclico (τ_e) de amplitud de uniforme es definido por $\tau_e=0.65\tau_{dm\acute{a}x}$

Resistencia a la licuación cíclica. La relación entre τ_L / σ'_v y el número de cargas cíclicas (N), se obtiene del resultado del ensayo triaxial cíclico. La resistencia a la licuación *in situ* (τ_R) correspondiente a (τ_e) es obtenida mediante:

$$\tau_R = c_r \bar{\sigma}_v \left(\frac{\tau_L}{\bar{\sigma}_c} \right)_{N=Ne}$$

Ne , se define como el número de cargas cíclicas cuando la fuerza externa de sismo es representada por el esfuerzo cortante de amplitud constante. La Figura 2 muestra el valor de Ne para una magnitud de sismo.

El coeficiente de corrección "Cr" es introducido a fin de considerar la condición de esfuerzo *in situ*, el cual es una función de la densidad relativa, en la Figura 3 se indica la relación entre Cr y Dr.

Mediante una normalización respecto del esfuerzo vertical efectivo, se obtiene:

$$CRR_{in-situ} = \frac{\tau_R}{\bar{\sigma}_v} = c_r \left(\frac{\tau_L}{\bar{\sigma}_c} \right)_{N=Ne} = c_r [CRR_{lab}]_{N=Ne}$$

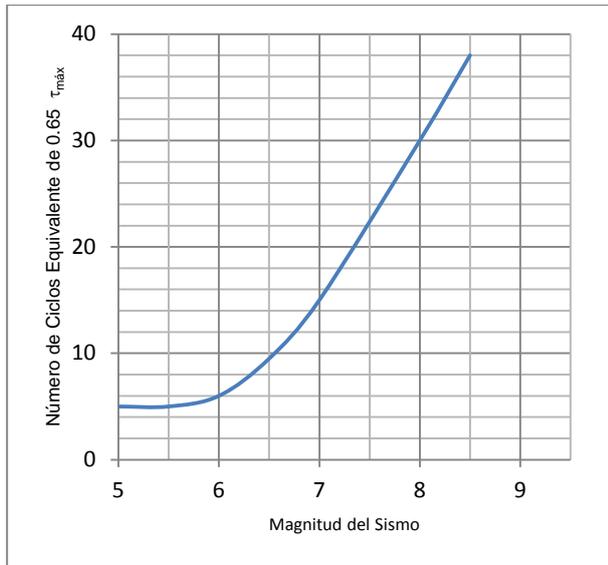


Figura 2. Número equivalente de ondas de esfuerzo uniforme cíclico basado en componentes de movimiento del terreno

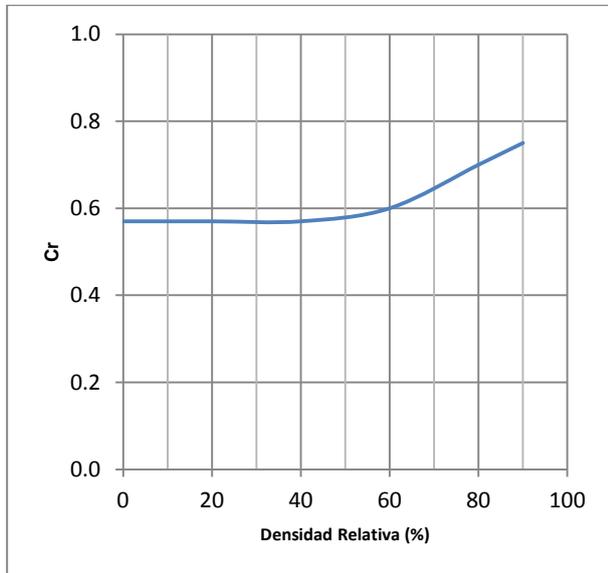


Figura 3. Relación entre Cr y la densidad relativa (Seed et al. 1971)

1.2 Método propuesto por Iwasaki et al.

Relación de esfuerzos cíclicos durante el sismo. Esta relación se obtiene mediante el cociente entre el esfuerzo cortante máximo $\tau_{dm\acute{a}x}$ y el esfuerzo vertical efectivo $\sigma'v$

$$CSR = \left(\frac{\tau_{dm\acute{a}x}}{\sigma'v} \right)$$

Relación de resistencia cíclica del estrato. La resistencia a la licuación *in situ* es calculada como:

$$CRR = c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 \left(\frac{\tau_L}{\bar{\sigma}_c} \right)_{Nl=20}$$

Dónde:

$c_1 = (1+2K_0)/3$, coeficiente de corrección por el estado isotrópico de esfuerzos.

$c_2 = 1.67$, coeficiente de corrección relacionado a la irregularidad de la forma de la onda del sismo.

$c_3 c_4 = 1$, coeficiente de corrección relacionado a la perturbancia y densificación de la muestra.

$c_5 = 0.90$, coeficiente de corrección por el movimiento multidireccional.

$K_0 = 1 - \sin\phi$, coeficiente de presión lateral de tierra en reposo

$$CRR = \frac{0.90 (1 + 2K_0)}{0.63} \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_L}{\bar{\sigma}_c} \right)_{Nl=20}$$

1.3 Método basado en la Teoría de Daño Acumulativo (Annaki & Lee)

Relación de esfuerzos cíclicos durante el sismo. Similar al método de Seed et. al, el valor máximo del esfuerzo cortante cíclico obtenido del análisis de respuesta sísmica, es convertido en un esfuerzo de corte cíclico de amplitud constante. La relación de esfuerzo de corte es el siguiente:

$$CSR = \frac{\tau_e}{\bar{\sigma}_v} = 0.65 \frac{\tau_{dm\acute{a}x}}{\bar{\sigma}_v}$$

Relación de resistencia a la licuación del estrato. Basado en las correcciones indicadas en el inicio de la evaluación, el valor de la relación de resistencia cíclica es:

$$CRR_{in-situ} = 0.90 \frac{(1 + 2K_0)}{3} \left(\frac{\tau_{dm\acute{a}x}}{\bar{\sigma}_v} \right)_{N=Neq}$$

Neq es el número de ondas, cuya amplitud de onda es $0.65\tau_{dm\acute{a}x}$.

2. COMPARACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE CORRECCIÓN

Los métodos anteriores mencionados, están condicionados por una serie de correcciones, por lo que el valor del CRR *in situ* tiene la forma general.

$$CRR_{in-situ} = a [CRR_{lab}]_{N=b}$$

Donde el valor de "a" y "b" se indican en la Tabla 2, según los métodos propuestos tiene el siguiente valor.

Tabla 2. Factores de corrección según métodos propuestos

Evaluación por:	Factor de corrección	
	a	b
Método propuesto por Seed	Cr	N _e
Método propuesto por Ishihara	$(0.90/C_k) \times (1+2K_o)/3$	20
Método propuesto por Iwasaki et al.	$(0.90/0.63) \times (1+2K_o)/3$	20
Teoría de daño acumulativo por Annaki & Lee	$(0.90) \times (1+2k_o)/3$	N _{eq}

3. APLICACIÓN DEL MÉTODO

El 15 agosto del 2007 el departamento de Ica fue devastado por un sismo de magnitud de 7.9Mw, siendo la ciudad de Tambo de Mora la que más daños tuvo en sus edificaciones y cimientos, debido principalmente a problemas de licuación de suelos, tal como se indica en el plano de daños elaborado por el CISMID (Figura 4).

En el año 2008 el CISMID realizó una campaña de exploración geotécnica para la evaluación de licuación en el área de Tambo de Mora. En este estudio se ha tomado la información del sondaje S-9 donde se realizaron ensayos de penetración estándar y ensayos de laboratorio de caracterización física. El perfil de suelo se describe en la Tabla 3.

Según los estudios del Cismid, la geología de la zona corresponde a cuaternario antiguo y reciente en la zona de estudio y al Noreste se presenta el batolito de los Andes con afloramiento de rocas ígneas. La geomorfología corresponde a una planicie de la costa. Predomina las formaciones del cuaternario unidades estratigráficas de depósitos de sedimentos marinos de arena fina, además de la presencia de los depósitos eólicos de arenas finas y depósitos aluviales de origen de huaycos.

De los resultados de exploración de campo sólo se obtuvo información de ensayos de penetración estándar hasta 3.0 m de profundidad, mientras que el perfil de velocidades de onda de corte se obtuvo hasta 24.90 m de profundidad. Para completar la información del número de golpes de SPT, se ha utilizado las correlaciones entre N_{spt} y V_s. Según los depósitos de arena y depósitos aluviales la que mejor se ajustan son las correlaciones propuestas por Shibita (1970) y Ohba y Toriuma (1970). Se ha considerado que hasta la profundidad de 3.0 m el depósito es de arena y entre 3.0 y 29.9 m corresponde a un depósito aluvial.

Se ha visto por conveniente completar esta información del número de golpes de SPT, para determinar la densidad relativa (D_r) y el ángulo de fricción (φ) de cada estrato, siendo los parámetros necesarios para obtener los valores de Cr y K_o respectivamente. Las correlaciones de Terzaghi y Peck son las que proporcionan valores más conservadores.

3.1 Cálculo del Esfuerzo Cíclico

El movimiento inducido por el sismo desde la base rocosa hacia cada una de los estratos del perfil de suelo se realiza mediante un *análisis de respuesta sísmica*, para lo cual se ha utilizado el registro sísmico del 15 de agosto del 2007 de la Estación ICA, componente NS. Este registro ha obtenido de la página web de la Red de Acelerográfica del CISMID (Redacis). En la Figura 5 se muestra el tiempo historia de la aceleración medido en la superficie terrestre.

Las propiedades físicas del suelo están indicadas en la Tabla 3. Las propiedades dinámicas de la arena se estimaron a partir del módulo de corte y amortiguamiento propuesto por Seed & Idriss (1970) e Idriss (1990), respectivamente. El análisis fue realizado mediante el uso del software Edushake, para obtener el tiempo-historia del esfuerzo de corte cíclico.

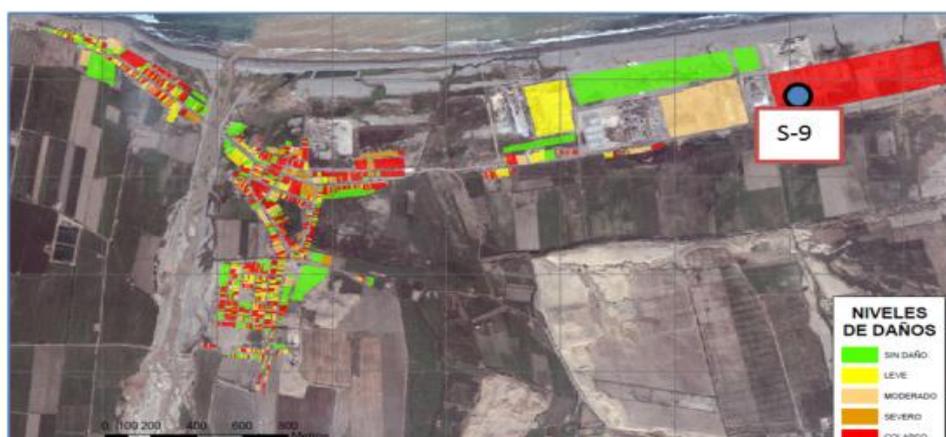


Figura 4. Mapa de nivel de daño, sondaje S-9. Fuente Cismid (2008)

Proyecto: Trabajo escalonado- Evaluación del Potencial de Licuación										
Sondaje: S-9										
Nivel freático: 1.00 m										
Fecha: 05/03/2013 00:00										
Nº Estrato	Tipo de suelo	FC (%)	Espesor (m)	Prof. (m)	Peso unitario (T/m ³)	N-SPT	Dr (%) (**)	ϕ (°) (***)	Velocidad onda corte (m/s)	Modulo de Corte (T/m ²)
1	SM	6.0	1.00	1.00	1.80	9	34	29	100	1835
2	SP-SM	11.4	1.20	2.20	2.00	14	43	31	120	2936
3	SP-SM	11.4	2.90	5.10	2.00	30	66	36	175	6244
4	S ^w -SM	11.4	1.80	6.90	2.00	14	43	31	190	7360
5	SP-SM	11.4	2.00	8.90	2.10	22	55	34	220	10361
6	SP-SM	11.4	2.00	10.90	2.10	29	64	36	240	12330
7	SP	11.4	2.00	12.90	2.10	33	69	37	250	13379
8	SP	11.4	12.00	24.90	2.20	40	77	39	265	15749
base					2.20				350	27472

Tabla 3. Características físicas del suelo. Número de golpes de SPT, Velocidad de onda de corte (Sondaje S-9)

(**) Densidad relativa se obtuvo de la correlación propuesto por Terzaghi & Peck (1966)

(***) Ángulo de fricción se obtuvo de la correlación de Terzaghi & Peck (1966)

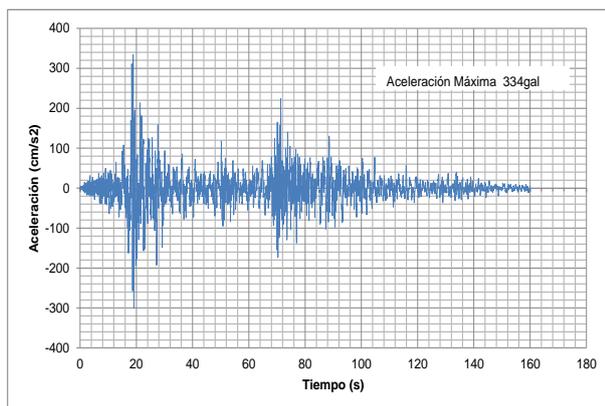


Figura 5. Tiempo historia de la aceleración, Estación Ica, componente N-S.

Del resultado obtenido del análisis de respuesta sísmica, se ha realizado una hoja de cálculo para contar el número de ondas equivalentes, obteniendo como resultado, más de dos esfuerzos cortante pico que superan el 60% de $\tau_{dm\acute{a}x}$ en cada estrato del perfil del suelo, por lo que se considera según el patrón de formas de onda propuesto por Ishihara como vibración. En la Figura 6 se muestra el tiempo historia del esfuerzo cortante del estrato 2, la carga es tipo vibración.

3.2 Resultado del Ensayo de Resistencia a la Licuación

El resultado del ensayo de licuación, de una muestra de suelo del sondaje S-9, Arena Limosa (SM), ubicado a 1.0m de profundidad y remoldeado a una densidad relativa $Dr=34\%$ para

la condición de licuación inicial ($r_u=100\%$), se muestra en la Figura 7.

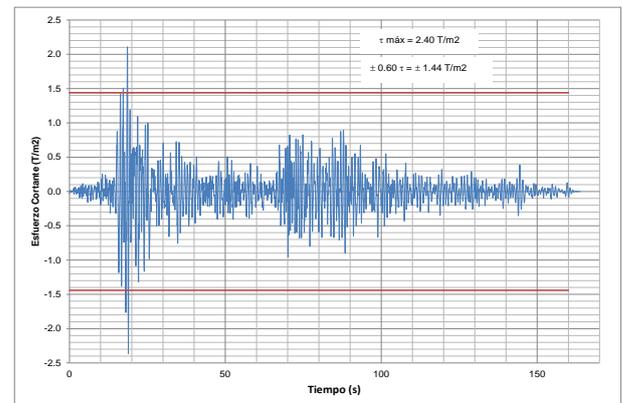


Figura 6. Tiempo historia del esfuerzo cortante, carga tipo vibración

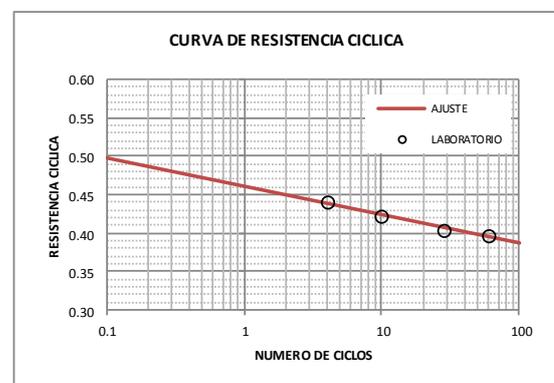


Figura 7. Resultado del ensayo triaxial cíclico.

3.3 Cálculo del CRR de cada Estrato

Para determinar el CRR de cada estrato, la experiencia de Lee & Seed (1967) indica que resistencia a la licuación es proporcional a la densidad relativa en condiciones de licuación inicial ($r_u=100\%$). El procedimiento realizado es mediante una proporción de las densidades relativas, a partir del resultado de laboratorio CRR(o) que ha sido ensayada a una densidad relativa DR(o), mediante la siguiente expresión:

$$CRR(i) = CRR(o) * DR(i) / DR(o)$$

Donde "i" indica el estrato i-esimo, del perfil de suelo considerado. ($CRR = \tau_L / \sigma'_v$)

En la Figura 8 se indica la resistencia cíclica de laboratorio (CRR) de los 7 estratos que componen el perfil del suelo del sondaje S-9.

3.4 Cálculo del CRR in situ

Una vez determinada la CRR de cada estrato, se determina la CRR *in situ* con las correcciones indicadas en la Tabla 2. Para el método propuesto por Seed et al., se ha considerado un sismo de magnitud $M_w=8.0$, correspondiente a un $N_e=30$. La determinación del potencial de licuación para el estrato 2 según el método de Seed et al. en la Figura 9.

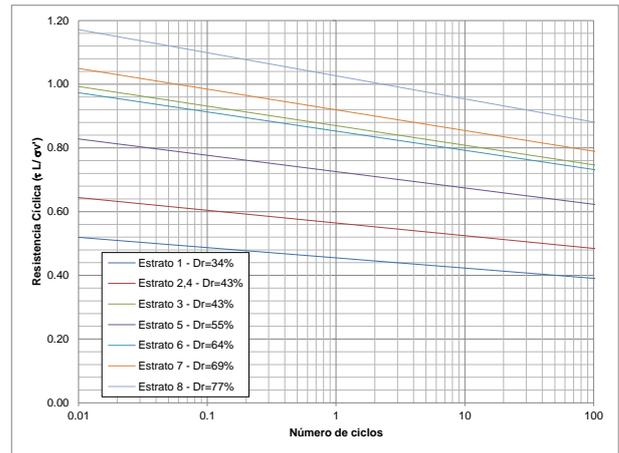


Figura 8. Resultado del ensayo triaxial cíclico

Para la evaluación del potencial de licuación de según Iwasaki e Ishihara el procedimiento es similar al anterior, con la diferencia de las correcciones correspondientes y el valor de $N_e=20$.

Para el método propuesto por Annaki & Lee, el número de ondas N_{eq} , se determina a partir del registro de tiempo-historia de esfuerzo de cortante. El procedimiento consiste en contar los esfuerzos cortantes pico mayor o igual al esfuerzo cortante umbral (para un $N=50$) y determinar el número de ondas del registro respecto al número de ondas efectivas (N para $CSR = \tau_L / \sigma'_v$). Para mayor detalle del procedimiento ver ref. [5,6]. El potencial de licuación por el método de Annaki & Lee se presenta en la Figura 10.

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN POR EL METODO DE SEED ET AL.

ESTRATO : 2
Corrección de la resistencia in-situ SEED ET AL. [Cr]

- 1.- Presión vertical efectiva (σ'_v) : 2.40 T/m2
- 2.- Máximo esfuerzo de corte ($\tau_{dm\acute{a}x}$) : 2.36 T/m2
- 3.- Esfuerzo de corte Equivalente ($\tau_e = 0.65\tau_{dm\acute{a}x}$) : 1.53 T/m3
- 4.- Razón de Esfuerzo cíclico ($N_e=30$; $CRR = \tau_L / \sigma'_c$) : 0.28
- 5.- Esfuerzo de corte Licuable (τ_L) : 0.67 T/m2

Comparación entre el esfuerzo cortante para generar licuación y el inducido por el sismo

$$\begin{array}{l} \tau_L \text{ (Kg/cm2)} < \tau_e \text{ (Kg/cm2)} \\ 0.67 < 1.53 \end{array} \quad \text{(Ocurre Licuación)}$$

6.- Razón de Esfuerzo Cíclico (CSR)
CSR = 0.639

7.- Razón de Resistencia Cíclica (CRR)
CRR = 0.28

8.- Factor de Resistencia a la Licuación
 $FS = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0.278}{0.639}$

$$FS = 0.44 \quad \text{OCURRE LICUACION}$$

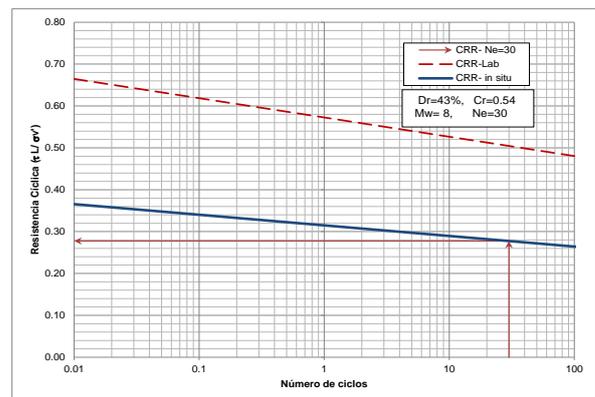


Figura 9. Evaluación de potencial de licuación por el método de Seed et al. (Estrato 2)

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN POR EL MÉTODO DE NÚMERO DE ONDA EQUIVALENTE

ESTRATO : 2
 Corrección de la resistencia in-situ ANNAKI & LEE $[0.9(1+2K_0)/3]$

1.- Presión vertical efectiva (σ'_v)	:	2.40 T/m ²
2.- Máximo esfuerzo de corte (τ_{max})	:	2.36 T/m ²
3.- Esfuerzo de corte Equivalente ($\tau_e=0.65\tau_{max}$)	:	1.53 T/m ²
4.- Razón de Esfuerzo cíclico (CSR= τ_e/σ'_v)	:	0.64
5.- Nef(N respecto a CSR-ver curva $\tau L/\sigma'_v$)	:	0.01
6.- Razón de Esfuerzo cíclico CRR($N_{eq}=44.7$)	:	0.29
7.- Esfuerzo cíclico Umbral (N=50)	:	0.70 T/m ²

Conversión de Número de ondas equivalentes
 $N_{eq}=N_{ef} \times 0.5 \times \sum(1/N_f) = 0.001 \times 0.5 \times 8939.6$
 $N_{eq}=N_{ef} \times 0.5 \times \sum(1/N_f) = 44.70$

Razón de Resistencia Cíclica

$$CRR = 0.292$$

Factor de Resistencia a la Licuación

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0.292}{0.639}$$

FS= 0.46 OCURRE LICUACION

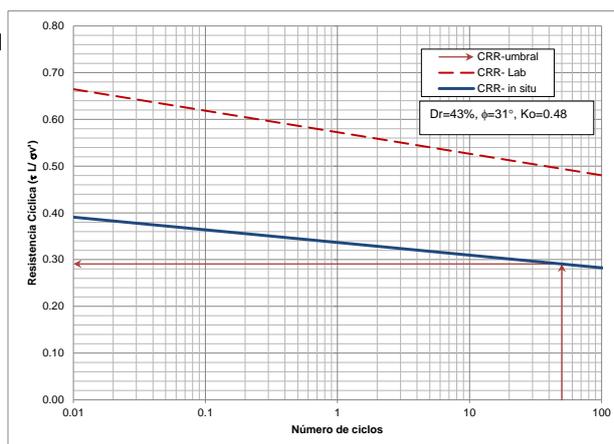


Figura 10. Evaluación de potencial de licuación por el método Annaki & Lee (estrato 2)

3.5 Cálculo de CRR y CSR, Método NCEER

Para determinar el potencial de licuación por el método del NCEER, se ha elaborado una hoja de cálculo según los requerimientos de la aceleración máxima, magnitud de sismo, tipo de suelo y el contenido de finos, el valor de N_{spt} , entre otros. Para mayor detalle de la aplicación de este método, ver ref.[1].

En la tabla 4 se indica el resumen de la evaluación del potencial del perfil de suelo, por el método NCEER

Profundidad (m)	Clasificación SUCS	Ncampo	Contenido de Finos (%)	CRR7.5	CSR	MSF	Factor de Seguridad
1	SM	9	6	0.13	0.21	0.85	0.51
2.2	SP-SM	14	11.4	0.19	0.30	0.85	0.55
5.1	SP-SM	30	11.4	0.35	0.35	0.85	0.84
6.9	SW-SM	14	11.4	0.14	0.36	0.85	0.33
8.9	SP-SM	22	11.4	0.19	0.36	0.85	0.44
10.9	SP-SM	29	11.4	0.24	0.35	0.85	0.57
12.9	SP	33	11.4	0.25	0.33	0.85	0.64
24.9	SP	40	11.4	0.34	0.22	0.85	1.28

Tabla 4. Resumen de potencial de licuación por el método de NCEER

4. RESULTADO

Se realiza una comparación del factor de seguridad y los esfuerzos cortantes en cada estrato, según los diferentes métodos, como se indica en la Tabla 5. En la Figura 11 se muestra la

variación en términos de factor de seguridad y el esfuerzo de corte.

5. CONCLUSIONES

- Para este caso particular, el tipo de carga cíclica inducida por el sismo desde la base a cada uno de los estratos, es del tipo vibración según Ishihara.
- El número de ondas de esfuerzo cortante uniforme por los métodos propuestos de Iwasaki y Ishihara, Seed et al. es de 20 y 30, mientras que según lo propuesto por Annaki & Lee varía entre 22 a 50.
- La evaluación mediante la comparación esfuerzo cortante de licuación y el esfuerzo cortante inducido por el sismo, presenta ocurrencia de licuación entre 1.0 hasta 22.0 m de profundidad.
- A partir de la evaluación mediante el factor de seguridad, la ocurrencia de licuación es entre 1.0 hasta 22.0m de profundidad.
- En ambos casos la licuación ocurre a profundidades no menores de 9.0 m y se puede estimar que a profundidades mayores que 18.8 m no ocurre licuación, eso no quiere decir necesariamente que el daño producido en la superficie será nulo, para ello se deberá realizar un análisis de índice de potencial de licuación.

Tabla 5. Factor de seguridad y esfuerzos cortantes según métodos.

Prof(m)	Factor de Seguridad				
	ISHIHARA	IWASAKI	SEED ET AL	ANNAKI & LEE	NCEER(SPT)
1.00	0.48	0.53	0.30	0.33	0.51
2.20	0.67	0.75	0.44	0.46	0.55
5.10	0.81	0.91	0.64	0.57	0.84
6.90	0.68	0.75	0.44	0.46	0.33
8.90	0.90	1.00	0.65	0.63	0.44
10.90	1.08	1.20	0.84	0.73	0.57
12.90	1.18	1.32	0.96	0.80	0.64
24.90	1.55	1.72	1.35	1.04	1.28

Prof. (m)	τ sismo	τ L (Kg/cm ²)			
		Annaki	Seed	Iwasaki	Ishihara
1.00	0.67	0.22	0.20	0.36	0.32
2.20	1.53	0.71	0.67	1.15	1.03
5.10	3.37	1.91	2.16	3.05	2.74
6.90	4.34	1.99	1.89	3.26	2.93
8.90	5.20	3.27	3.36	5.21	4.69
10.90	6.18	4.51	5.20	7.42	6.68
12.90	7.17	5.73	6.92	9.44	8.50
24.90	9.71	10.15	13.13	16.71	15.03

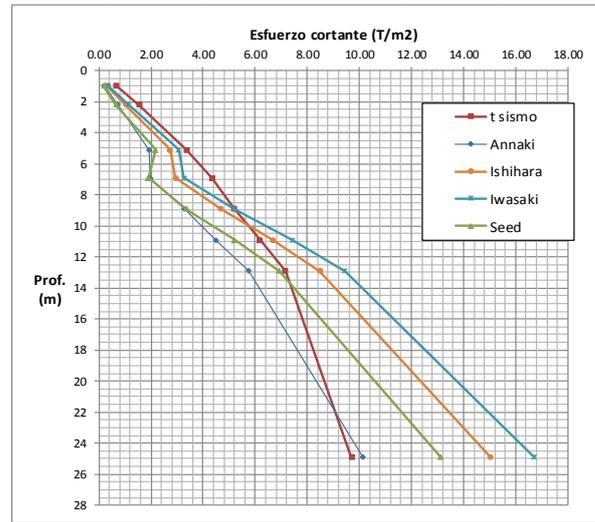
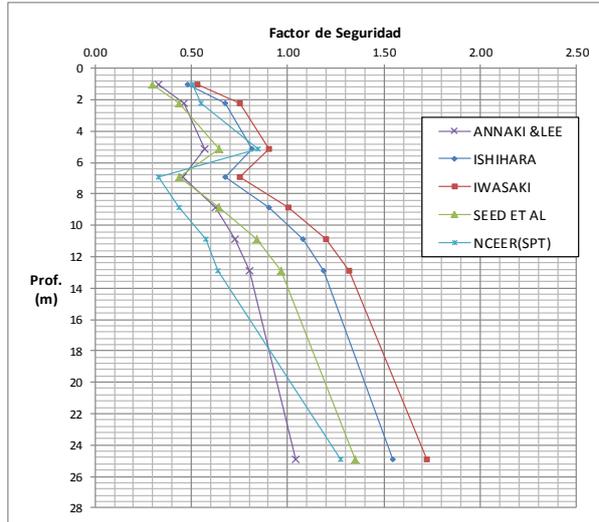


Figura 11. Variación de factores de seguridad y esfuerzos cortante.

- En el método de Annaki & Lee, el potencial de licuación da valores de FS muy cercanos al método del NCEER, siendo este último muy usual en la práctica.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ayala R., (2010). "Evaluación del potencial de licuación de suelos de la ciudad de Tambo de Mora". Tesis de Grado.
- [2] Das B. (1993). "Fundamentals of Soils Dynamics". PWS-KENT. USA
- [3] Jafari, M.K., Shafiee, A., Razmkhah, A, (2002) "Dynamic Properties of Fine Grained Soils in South of Tehran", JSEE. Vol 4. No. 1
- [4] Lee, K.L & Seed H.B. (1967). "Cyclic stress conditions causing liquefaction of Sand", J. SMFE, ASCE, Vol. 93 No. SMI. Paper 5058, pp. 47-70
- [5] Meneses L. J. & Alva H. J. (1987). "Número de ciclos equivalente de las ondas sísmicas peruanas". V congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Lima.
- [6] Port and Harbour Research Institute (1997). "Handbook on liquefaction remediation of reclaimed". Translate by Experiment Station, US Army Corps of Engineers, USA.

- [7] Seed, H.B. & Idriss, I.M. (1971). "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", J. SMFE, ASCE. Vol. 97, No. SM9. pp. 1249-1273
- [8] Youd T. L. et al (2001), "Liquefaction resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.