

# Liquiter

<b>Part I Liquiter</b>	<b>1</b>
<b>Part II Guía de los menús</b>	<b>3</b>
1 Archivo .....	3
2 Nuevo proyecto .....	3
3 Datos .....	4
4 Estratigrafía .....	7
5 Opciones Report .....	9
6 Vista .....	10
7 Cálculo .....	11
<b>Part III Referencias teóricas</b>	<b>13</b>
1 Métodos simplificados .....	13
Introducción .....	13
Seed e Idriss .....	15
Iwasaki et alii .....	19
Tokimatsu e Yoshimi .....	20
Finn .....	21
Cortè .....	21
Robertson e Wride .....	22
Robertson e Wride modificato .....	24
Idriss e Boulanger (2008) .....	26
Andrus e Stokoe .....	27
NTC 2008 .....	28
EC8 .....	33
2 Limit State of Liquefaction C. Hsein Juang 2006 .....	36
3 Obras .....	37
Drenes de grava .....	37
Heavy tamping .....	40
4 Lateral Spreading .....	41
Lateral Spreading .....	41
<b>Part IV Bibliografía</b>	<b>43</b>
<b>Part V Geoapp</b>	<b>49</b>
1 Geoapp Section .....	49
<b>Part VI Utility</b>	<b>50</b>
1 Tablas de Conversión .....	50
2 Database Suelos .....	51
<b>Part VII Contactos</b>	<b>54</b>
<b>Index</b>	<b>0</b>

# 1 Liquiter

Liquiter es un software para el análisis de la licuefacción de suelos en condiciones sísmicas en el cual los datos de entrada se pueden extraer de varios tipos de ensayos.

En síntesis, el programa suministra los siguientes resultados:

- *Factor de seguridad licuefacción / Índice del potencial de licuefacción.*
- *Movilidad cíclica para las arcillas.*
- *Licuefacción de arenas y arcillas.*
- *CSR, CSR variable según la profundidad (SHAKE).*
- *Reconsolidación, Lateral Spreading.*
- *Fuerza residual.*

Estrato No.	FC (%)	Valor	Nº	Profundidad desde el p. (m)	Presión horizontal total (kPa)	Presión vertical efectiva (kPa)	Corrección presión horizontal efectiva (kPa)	Número golpes corregidos (NCLAS)	Coeficiente reductor (Rd)	Resistencia a la licuefacción (CSR)	Esfuerzo de corte normalizado (CSR)	Coeficiente de seguridad (Fs)
(1) - (1) (1-2)	13	Variable	3	1.50	26.600	24.678	1.254	46.000	1.046	35.000	0.538	35.000
(2) - (2) (2-2)	13	Variable	2	1.90	30.300	26.277	1.243	46.000	1.044	35.000	0.538	35.000
(3) - (3) (3-2)	13	Variable	3	2.30	33.800	27.926	1.675	29.954	1.042	0.537	0.344	0.98
(4) - (4) (3-14)	13	Variable	4	2.30	37.400	29.555	1.637	29.425	1.039	0.532	0.339	0.96
(5) - (5) (3-14)	13	Variable	5	2.30	41.000	31.183	1.602	24.936	1.037	0.527	0.332	0.93
(6) - (6) (3-20)	13	Variable	6	2.70	44.600	32.832	1.567	24.739	1.034	0.525	0.324	0.91
(7) - (7) (3-22)	13	Variable	7	2.80	48.200	34.481	1.536	24.291	1.032	0.520	0.319	0.79
(8) - (8) (3-22)	14	Variable	8	3.10	51.800	36.130	1.527	23.985	1.029	0.516	0.315	0.75
(9) - (9) (3-24)	14	Variable	9	3.30	55.400	37.779	1.514	23.763	1.028	0.514	0.312	0.69
(10) - (10) (3-26)	14	Variable	10	3.50	59.000	39.428	1.487	23.529	1.024	0.510	0.307	0.66
(11) - (11) (3-28)	14	Variable	11	3.70	62.600	41.077	1.462	23.274	1.021	0.506	0.303	0.63
(12) - (12) (3-30)	14	Variable	12	3.90	66.200	42.726	1.440	23.040	1.018	0.502	0.300	0.61
(13)	4.10	49.800	13	4.10	69.800	44.375	1.415	22.824	1.015	0.500	0.297	0.59
(14)	4.30	75.400	14	4.30	73.400	46.024	1.390	22.579	1.012	0.496	0.294	0.58
(15)	4.50	79.000	15	4.50	77.000	47.673	1.365	21.895	1.009	0.492	0.291	0.56
(16)	4.70	80.600	16	4.70	80.600	49.322	1.340	21.650	1.007	0.490	0.289	0.55
(17)	4.90	84.200	17	4.90	84.200	50.971	1.315	21.395	1.004	0.487	0.286	0.53
(18)	5.10	87.800	18	5.10	87.800	52.620	1.290	21.150	1.001	0.484	0.283	0.52
(19)	5.30	91.400	19	5.30	91.400	54.269	1.265	20.905	0.998	0.482	0.281	0.51
(20)	5.50	95.000	20	5.50	95.000	55.918	1.240	20.714	0.994	0.479	0.278	0.48
(21)	5.70	98.600	21	5.70	98.600	57.567	1.215	20.469	0.991	0.476	0.275	0.46

\* video recorded with an english interface

**Liquiter requiere de datos basados en los resultados de varios métodos de investigación:**

- Standard Penetration Test (SPT).
- Estudios de determinación de velocidad de las ondas de corte (Vs).
- Cone penetration test (CPT).
- Cone penetration test electric (CPTe).

- Cone penetration test Piezocone (CPTU).

#### **Estimación de la Magnitude Scaling Factor (MSF)**

- Seed & Idriss, 1990
- Idriss, 1995
- Andrus & Stokoe, 1997,2000
- Idriss & Boulanger, 2008,2014

#### **Factor de correccion de la tension litostatica ( $K\sigma$ )**

- NCEER (Youd, 1997)

#### **Normalización de las velocidades de las ondas de corte con la tensión litostática**

- Robertson et al., 1992

#### **Corrección del número de golpes del ensayo SPT con la tensión litostática (Cn)**

- Liao and Whitman, 1986

#### **Resistencia residual post-licuefacción (Sr)**

- Idriss & Boulanger, 2009,2014

#### **Corrección por la presencia de materiales finos (Sr)**

- Idriss & Seed, 1997 (NCEER Workshop)
- Robertson & Wride, 1997 (NCEER Workshop)
- Idriss & Boulanger, 2004, 2014

#### **Cálculo del factor de seguridad de licuefacción con:**

- Andrus-Stokoe
- Boulanger-Idriss-CPT-2008
- Boulanger-Idriss-CPT-2014
- Boulanger-Idriss-NSPT, 2014
- Corte
- Eurocodice-8
- Finn
- Iwasaki
- Robertson-Wride
- Seed-Idriss
- Tokimatsu-Yoshimi
- NTC
- Youd et. al., 2002 Barlett and Youd, 1995  
Lateral Spreading

### **Índice del potencial de licuefacción (ILP)**

- Iwasaki et al. (1982)
- Sonmez (2003)

## **2 Guía de los menús**

### **2.1 Archivo**

#### **Nuevo (Ctrl+N)**

Permite crear un nuevo proyecto. El comando se activa también en la barra de herramientas Estándar.

#### **Abrir**

Para abrir un proyecto existente ya elaborado y archivado en formato (\*.lqf). El comando se activa también en la barra de herramientas Estándar.

#### **Guardar (Ctrl+F12)**

Guarda los datos del proyecto corriente. El comando se activa también en la barra de herramientas Estándar.

#### **Guardar como**

Guarda el proyecto con otro nombre.

#### **Salir**

Permite salir del proyecto corriente.

#### **Reciente**

Permite ver los proyectos guardados recientemente.

### **2.2 Nuevo proyecto**

#### **Cómo crear un proyecto nuevo**

El software Liquiter (así como las nuevas versiones de los software Geostru) está desarrollado de forma tal que se comprenda y utilice de una manera fácil e intuitiva. Por lo tanto, será necesario describir solo algunos de los pasos a seguir para la creación de un proyecto nuevo.

Para crear un nuevo proyecto, clicar en el menú "Archivo" y sucesivamente "Nuevo". El software permite agilizar los pasos haciendo aparecer la ventana principal de "Datos generales" en la interfaz general. En esta se insertan los datos del proyecto y otros datos para el cálculo.

Se sigue clicando sobre las otras ventanas presentes en la barra de los menús y/o al lado (barra vertical a la izquierda).

## 2.3 Datos

### Datos del Estudio

Con este comando se activa una ventana en la cual se puede indicar los datos del Estudio o de la Sociedad. Se requiere una serie de informaciones: *razón social, tipo de sociedad, Número fiscal, Dirección, etc.*

Clicando sobre el icono, el usuario puede insertar una imagen/logo (\*.bmp; \*.jpg).

**Datos de la Sociedad**

Datos de la Sociedad Size: height 80px, width110px

Apellido/Razón Social: S.C.EngSoft S.R.L.

Nombre: Geostru

Título: eu NIF: [ ]

Dirección: Str. Sarmisegetuza nr. 21/25

Ciudad: Cluj-Napoca Código postal: [ ] Prov: [ ]

Teléfono: 0690289085 Móbil: [ ] FAX: [ ]

Inscripción: [ ] Numero: [ ]

Certificador: [ ] Numero: [ ]

Email: info@geostru.eu

Skype: [ ]

Sitio Web: https://www.geostru.eu/

Notas: [ ]

Ok Anular

## Datos Generales

En la sección 1 (*Proyecto y Ubicación*) se pueden insertar informaciones sobre el proyecto y sobre la ubicación de la obra. Estos datos podrán ser utilizados en la configuración de las salidas gráficas.

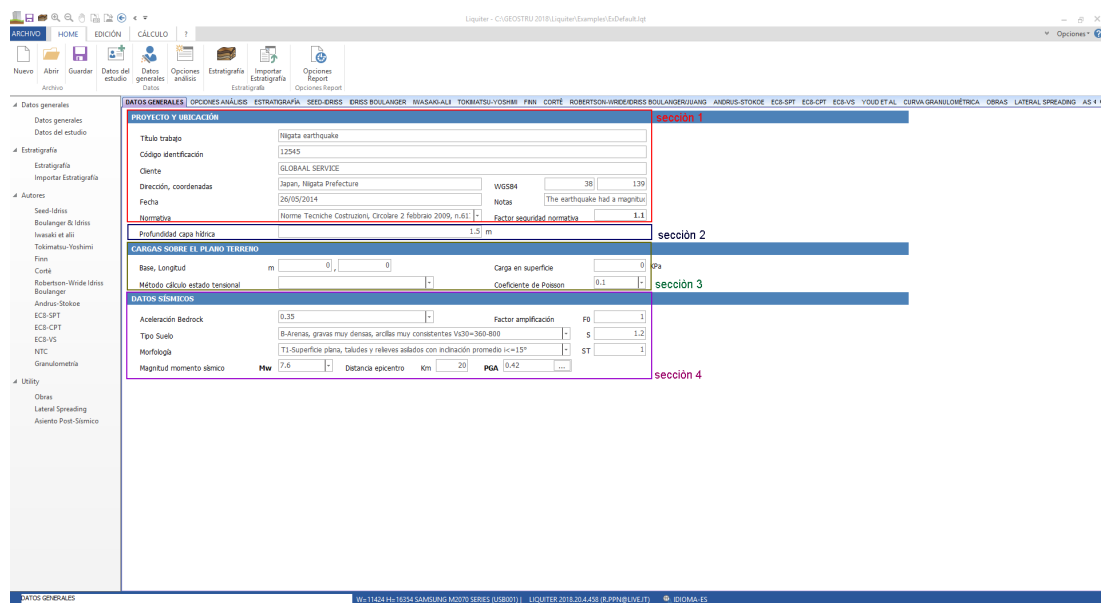
En esta misma sección se debe definir también la normativa de cálculo, el factor de seguridad.

En la sección 2 y la profundidad del nivel freático.

El programa permite estimar el incremento tensional en el terreno debido a la presencia de una sobrecarga en la superficie. Es suficiente con definir la geometría en la sección 3 (*Cargas sobre el plano del terreno*), seleccionar el método de cálculo e introducir el parámetro elástico requerido.

Para calcular **la sollicitación de corte máxima provocada por el sismo**, utilizada por varios autores en los métodos simplificados, en la estimación del factor de seguridad se requiere la aceleración máxima provocada por el sismo en superficie. Para este propósito, en la sección 4 se deben definir los datos sísmicos necesarios para determinarlo.

El código de cálculo utiliza la magnitud y la distancia epicentral para corregir la Relación de tensión cíclica mediante correlaciones propuestas por varios autores (a elegir en opciones de análisis).



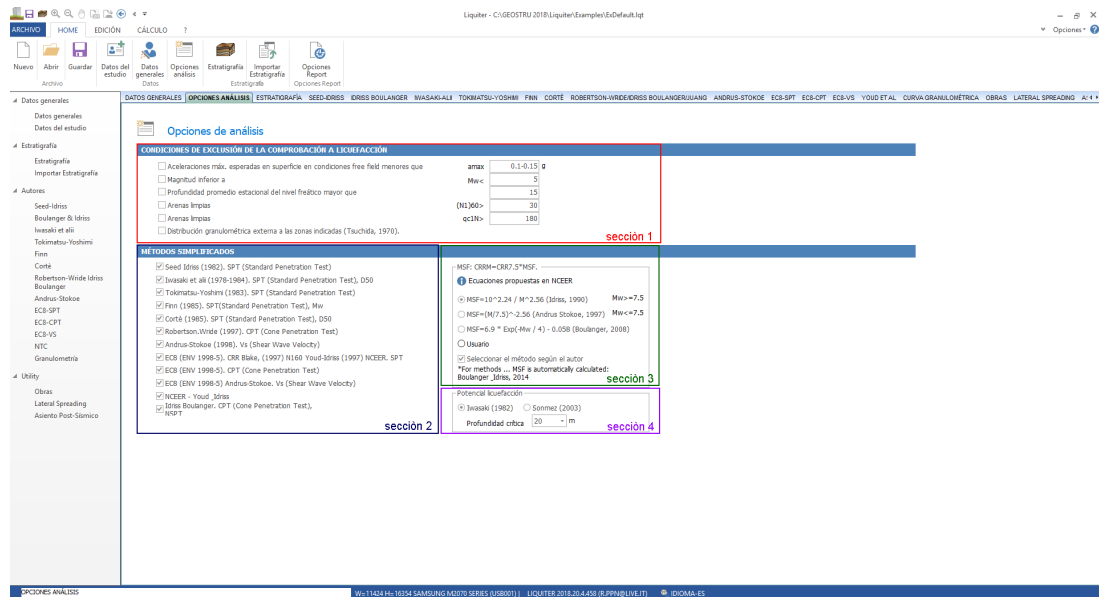
### Opciones de Análisis

En esta ventana el usuario puede definir las condiciones de exclusión de la comprobación a la licuefacción según las disposiciones legislativas utilizadas. Los límites se pueden modificar manualmente, escribiendo los valores en los respectivos campos (*sección 1*)

Es posible seleccionar el o los métodos que serán empleados en el proyecto (*sección 2*).

Para adaptar el valor de **CSR** (*Cyclic Stress Ratio*) a terremotos de magnitud diferente a 7.5, es necesario introducir el factor de corrección **MSF** (*Magnitudo Scaling Factor*), las ecuaciones de cálculo, sugeridas por el NCEER con base en el autor elegido, se deben definir seleccionándolas en la *sección 3*.

Il programma fornisce anche la stima dell'indice del potenziale di liquefazione, Iwasaki(1982) e Sonmez (2003) - *sezione 4*, riferendosi ad una profondità critica di 10 oppure 20 metri.



## 2.4 Estratigrafía

### Importar Estratigrafía

Seleccionando este comando, se activa una ventana de selección en la cual es posible importar archivos tipo (\*.txt, \*.edp). Los archivos provenientes de software GeoStru ( *Static Probing, Dynamic Probing...*) contienen todas las informaciones requeridas en la cuadrícula de la estratigrafía a utilizar en el cálculo.

### Estratigrafía

En la cuadrícula se deben indicar los siguientes parámetros geotécnicos:

#### DB

Colocándose con un clic en la correspondiente celda se puede seleccionar, del menú contextual, un tipo de suelo entre los presentes en el data base. Además, este último puede ser modificado por el usuario.

#### Descripción

Escribir el texto correspondiente a la nomenclatura de la litología.

#### Cotas del estrato

Indicar la cota inicial y la cota final de cada capa (*el plano del terreno representa cota cero*).



## **¡La cuota inicial del nivel 1 debe ser igual a cero!**

### ***Peso específico natural/saturado***

Indicar los pesos específicos a asignar al estrato.

### ***Número de golpes promedio (NSPT)***

Asignar el promedio de golpes del ensayo penetrométrico estándar.

### ***D50 (mm)***

Escribir el valor del diámetro correspondiente al 50% de pasante (*curva granulométrica*).

### ***Resistencia qc y resistencia rozamiento lateral fs***

Referir los valores de la resistencia por punta y de la resistencia lateral obtenidos con el ensayo estático.

### ***Trama***

Colocarse en la celda en la cual se desea insertar la trama y, clicando, aparecerá una ventana donde será posible elegir una imagen en formato (\*.jpg, \*.bmp) para asignar al estrato.

### ***Color***

Per asignar un color basta con hacer clic sobre la celda y se activa el botón para la vista de la paleta de colores.

Clicando el comando "**Report**", el programa prepara la tabla de la estratigrafía para la impresión o la exportación. Con el comando "**Gráfico**" se genera el gráfico *estratigrafía-profundidad, según el parámetro o los parámetros seleccionados (NSPT-profundidad, Qc-profundidad, VS-profundidad)*.

The screenshot displays the Liquiter software interface. The main window shows a table of stratigraphic parameters under the 'OPCIONES REPORT' tab. The table has columns for 'Estad o No', 'DB', 'Descripción', 'Cota inicial (m)', 'Cota final (m)', 'Peso específico (t/m³)', 'Peso específico sólido (t/m³)', 'Número promedio golpes (N/cm²)', and 'DS'. The data rows are numbered 1 through 11, with descriptions like 'S1', 'S2', 'C4', etc.

Estad o No	DB	Descripción	Cota inicial (m)	Cota final (m)	Peso específico (t/m³)	Peso específico sólido (t/m³)	Número promedio golpes (N/cm²)	DS
1		S1	1	2	16	19	51	1
2		S2	2	9	14	18	14	1
3		S3	8	12	14.5	18.65	22	1
4		C4	12	14	16	17	22	1
5		C5	14	16	18	19	18	1
6		C6	16	20	18.1	19	18	1
7		C7	20	22	18.5	19.5	16	1
8		C8	22	24	18.7	19.4	20	1
9		C9	24	26	18.9	19.2	22	1
10		C10	26	28	19	20	24	1
11		C11	28	30	19.1	21	26	1

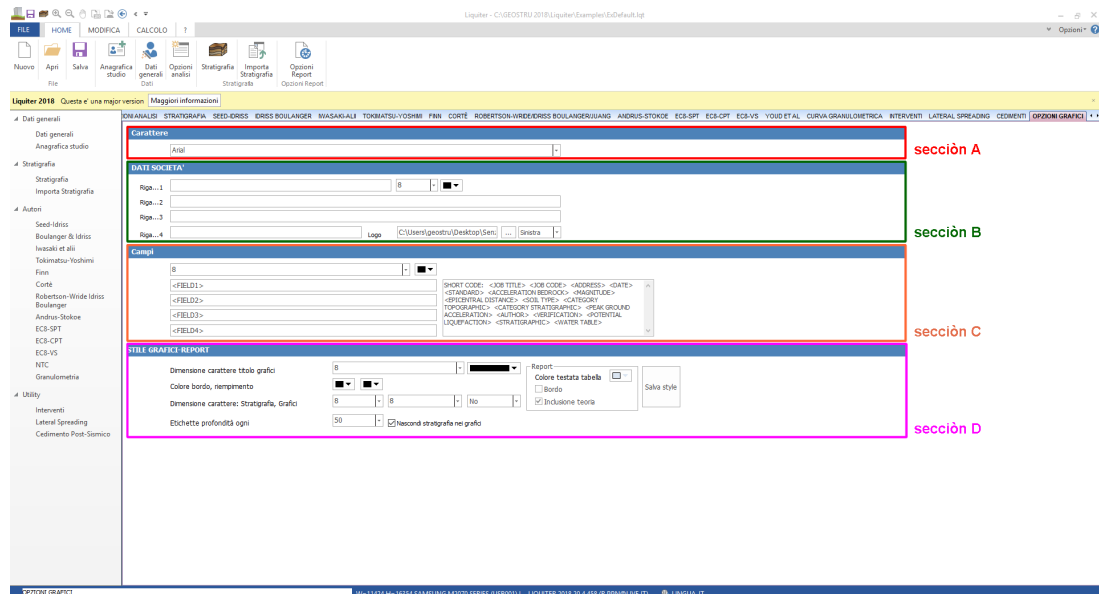
Overlaid on the main window are two smaller windows: 'OPCIONES REPORT' (top right) and 'Color' (bottom right). The 'Color' window shows a color selection tool with a color wheel and a 'Color' dropdown menu.

## 2.5 Opciones Report

En la *sección (A)* se elige el tipo de fuente a utilizar en el informe gráfico. Los datos de la sociedad se suministran en la *sección (B)*. En esta misma sección es posible insertar el logo (*imagen \*.bmp, \*.jpg*) y colocarlo a la derecha o a la izquierda, seleccionar las dimensiones y el color de los textos.

En la *sección (C)* se encuentran algunos campos adicionales de utilidad para el usuario: específicamente, copiando los **short code** disponibles y pegándolos en los campos: *Field1...Field2...Field3.....*, el usuario podrá crear un estilo, guardarlo (*mediante el comando guardar estilo*) y utilizarlo en otros proyectos. Se puede además seleccionar las dimensiones y el color de los textos.

La dimensiones y colores de fuente de los títulos de los gráficos, el color del borde, de los rellenos, la dimensión de las fuentes del gráfico estratigráfica y de los otros gráficos se pueden asignar en la *sección (D)*. El usuario puede definir el color del encabezado de las tablas, seleccionar incluir o no la teoría en la relación y guardar el estilo creado para usarlo en proyectos futuros.



## 2.6 Vista

Para acercar o alejar la imagen en el área de diseño se utilizan las opciones de zoom del programa. Estas se activan en la barra estándar, o también con el lado derecho del mouse sobre el área de diseño.

### Zoom (+)

El comando aplica un factor de aumento para ver la imagen con más detalle.

### Zoom (-)

Con este comando se aplica un factor de reducción para ver una parte mayor de la página.

### Zoom (100%)

Visualiza el diseño al 100% del tamaño normal.

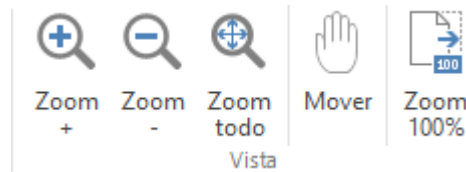
### Zoom (todo)

Ajusta la vista para visualizar todo el proyecto en el área de diseño.

### Mover

Este comando se activa apretando el lado derecho del mouse sobre el área de diseño y moviéndolo en cualquier dirección: horizontal, vertical o diagonal. El tamaño del diseño se mantiene tal como está, al igual que la

orientación en el espacio. Lo único que cambia es la porción que se ve del diseño.



## 2.7 Cálculo

En esta sección se pueden seleccionar todos los métodos implementados en el programa para la verificación de la licuefacción. La elección se puede con los comandos de la barra estándar (A), con el panel de la izquierda (B), o con los comandos especificados en (C).

Estrato	FC (%)	Validez	Nr.	Profundidad desde el p. l. (m)	Presión total (kPa)	Presión vertical efectiva (kPa)	Corrección presión lateral efectiva (kPa)	Número golpes corregido (N1,60)	Coefficiente reductor (Rf)	Resistencia a la licuefacción (CSR)	Esfuerzo de corte normalizado (CSR)	Coefficiente de seguridad (Fs)	Susceptibilidad de licuefacción
(1) - S1 (1-2)	13	Válido	1	1.70	26.600	24.639	1.254	46.000	1.046	10.000	0.308	10.00	Terreno no susceptible a
(2) - S2 (2-5)	13	Válido	2	1.90	30.200	26.277	1.241	46.000	1.044	10.000	0.308	10.00	Terreno no susceptible a
(3) - S3 (6-10)	13	Válido	3	2.20	33.800	27.936	1.675	25.654	1.042	6.337	0.314	0.90	Terreno susceptible a
(4) - C4 (12-14)	13	Válido	4	2.30	37.400	29.555	1.637	25.425	1.039	6.322	0.319	0.90	Terreno susceptible a
(5) - C5 (14-16)	13	Válido	5	2.50	41.000	31.193	1.602	24.656	1.037	6.310	0.322	0.90	Terreno susceptible a
(6) - C6 (16-20)	13	Válido	6	2.70	44.600	32.832	1.587	24.730	1.034	6.305	0.324	0.80	Terreno susceptible a
(7) - C7 (20-22)	13	Válido	7	2.90	48.200	34.471	1.559	24.291	1.032	6.295	0.324	0.70	Terreno susceptible a
(8) - C8 (22-24)	14	Válido	8	3.10	51.800	36.109	1.527	23.890	1.029	6.286	0.325	0.60	Terreno susceptible a
(9) - C9 (24-26)	14	Válido	9	3.30	55.400	37.748	1.514	23.703	1.026	6.282	0.325	0.60	Terreno susceptible a
(10) - C10 (26-28)	14	Válido	10	3.50	59.000	39.387	1.487	23.532	1.024	6.278	0.325	0.60	Terreno susceptible a
(11) - C11 (28-30)	14	Válido	11	3.70	62.600	41.025	1.462	23.374	1.021	6.268	0.326	0.60	Terreno susceptible a
(12) - C12 (30-32)	14	Válido	12	3.90	66.200	42.664	1.438	23.240	1.018	6.262	0.326	0.60	Terreno susceptible a
(13) - C13 (32-34)	14	Válido	13	4.10	69.800	44.303	1.415	23.124	1.015	6.257	0.327	0.60	Terreno susceptible a
(14) - C14 (34-36)	14	Válido	14	4.30	73.400	45.941	1.403	22.979	1.013	6.254	0.327	0.60	Terreno susceptible a
(15) - C15 (36-38)	14	Válido	15	4.50	77.000	47.580	1.384	22.865	1.010	6.250	0.327	0.60	Terreno susceptible a
(16) - C16 (38-40)	14	Válido	16	4.70	80.600	49.219	1.364	22.805	1.007	6.245	0.328	0.60	Terreno susceptible a
(17) - C17 (40-42)	14	Válido	17	4.90	84.200	50.857	1.345	22.738	1.004	6.241	0.328	0.60	Terreno susceptible a
(18) - C18 (42-44)	14	Válido	18	5.10	87.800	52.496	1.336	22.655	1.001	6.238	0.328	0.60	Terreno susceptible a
(19) - C19 (44-46)	14	Válido	19	5.30	91.400	54.135	1.318	22.564	0.998	6.233	0.328	0.60	Terreno susceptible a
(20) - C20 (46-48)	14	Válido	20	5.50	95.000	55.773	1.300	22.514	0.994	6.228	0.328	0.60	Terreno susceptible a
(21) - C21 (48-50)	14	Válido	21	5.70	98.600	57.412	1.284	22.483	0.991	6.224	0.328	0.60	Terreno susceptible a

## Seleccionando un método de cálculo como ejemplo:

### Seed Idriss

En (D) se indican las condiciones de validez y los datos necesarios para efectuar el análisis, específicamente: El método es válido para arenas con  $D50 > 0.25$ , arenas limosas y limos. Densidad relativa entre (40 - 80)%, los datos requeridos para la elaboración son NSPT y el D50 que se presentarán en [Estratigrafía](#) [7].

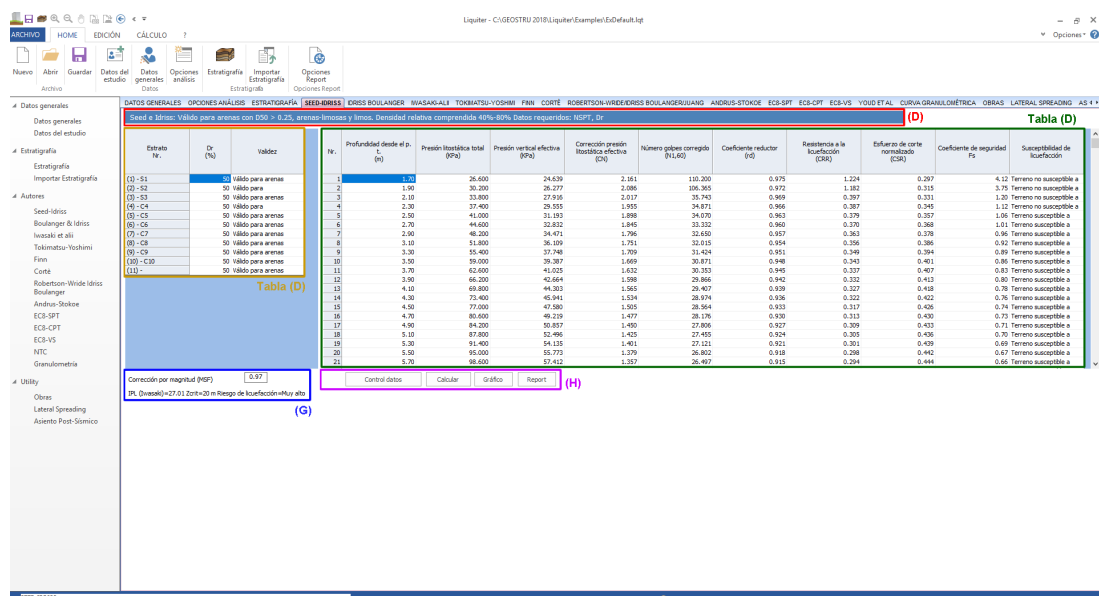
Después de haber asignado la estratigrafía se debe definir en la tabla (E) las opciones de validez del método estrato por estrato. El programa elabora los datos y presenta los resultados en la tabla (F) dando así los

resultados del análisis, es posible seleccionar los resultados y exportarlos con el comando copiar/pegar.

Para eventos sísmicos de magnitud mayor a 7.5 se calcula el valor del factor correctivo de la magnitud MSF utilizando la correlación o el método seleccionado en [Opciones de Análisis](#)<sup>[4]</sup>. Este valor calculado, así como el índice del potencial de licuefacción (IPL) y el riesgo asociado se ven en pantalla (G).

El programa prepara una detallada relación de cálculo, con referencias teóricas y resultados organizados en forma tabular. Luego de la elaboración de los datos es posible generar un gráfico que, en el caso de Seed e Idriss, está estructurado de esta manera: (*columna estratigráfica-profundidad, NSPT-profundidad, FS-profundidad*).

Para generar el output basta con seleccionar los comandos respectivos (H). Las opciones del report y del gráfico se pueden modificar en [Opciones Report](#)<sup>[9]</sup>.



### Curva Granulométrica

Según normativa, si la distribución granulométrica del terreno está fuera de las zonas indicadas como "críticas", se puede excluir la verificación a licuefacción, el terreno no es susceptible a licuefacción ([Referencias teóricas /NTC 2018](#)<sup>[28]</sup>).

El comando activa una ventana de diálogo caracterizada por una tabla y un gráfico. En la tabla se debe insertar:

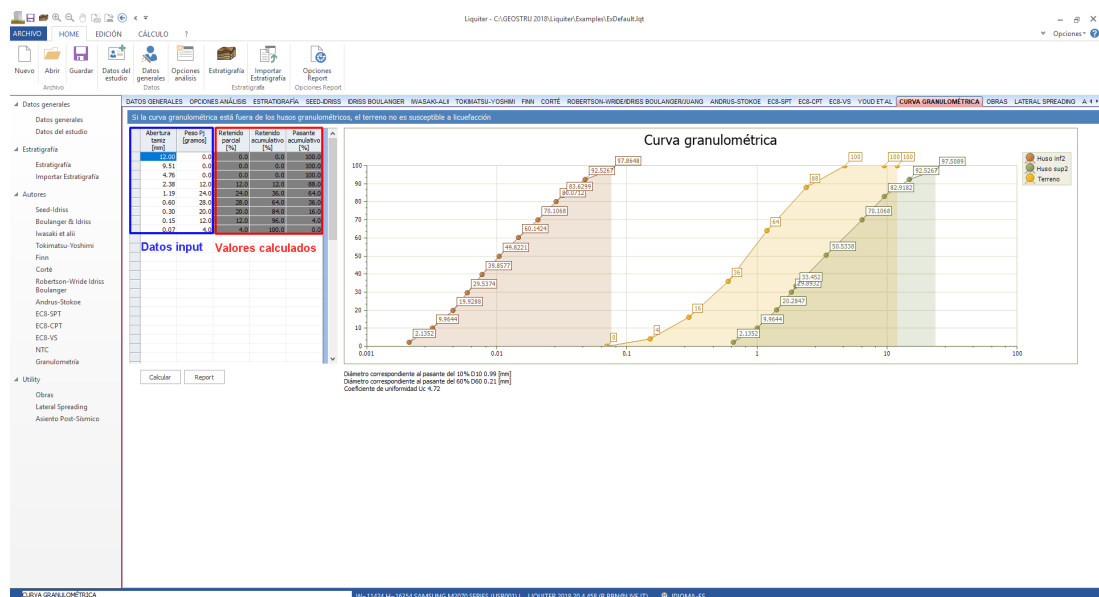
En la primera columna la abertura tamiz (recordamos que los de la serie A.S.T.M. en orden decreciente son:

38.10 mm, 25.40 mm, 19.00 mm, 12.70 mm, 9.51 mm, 4.76 mm, 2.38 mm, 1.19 mm, 0.595 mm, 0.297 mm, 0.149 mm, 0.074 mm.), en la segunda columna los pesos del RETENIDO PARCIAL. El programa

efectuara el cálculo del RETENIDO PARCIAL (%), DEL RETENIDO ACUMULATIVO (%) Y DEL PASANTE ACUMULATIVO (%). Hará la curva granulométrica del terreno y la representará junto con los husos granulométricos indicados por la normativa (para suelos coeficiente de uniformidad  $U_c < 3,5$  y para  $U_c > 3,5$ ).

Clicando en **"Report"** se prepara la impresión del gráfico y de una tabla con los datos de la curva granulométrica.

La información se puede guardar en (\*.bmp) con el comando guardar de la barra estándar o seleccionando en el menú con el lado derecho del mouse sobre el área del gráfico.



## 3 Referencias teóricas

### 3.1 Métodos simplificados

#### 3.1.1 Introducción

Los métodos simplificados se basan en la relación existente entre las sollicitaciones de corte que producen licuefacción y las provocadas por el terremoto; por lo tanto requieren calcular los parámetros relativos tanto al evento sísmico como al depósito. Los últimos determinados privilegiando métodos basados en correlaciones de la resistencia a la licuefacción con parámetros obtenidos mediante ensayos in situ. La resistencia del depósito a la licuefacción se estima por lo tanto en términos de factor de resistencia a la licuefacción

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

Donde **CRR** (*Cyclic Resistance Ratio*) indica la resistencia del terreno a los esfuerzos de corte cíclico y **CSR** (*Cyclic Stress Ratio*) la sollicitación de corte máxima provocada por el sismo.

Los métodos simplificados propuestos se diferencian entre sí principalmente por la forma como se obtiene CRR, la resistencia a la licuefacción. El parámetro más utilizado es el número de golpes del ensayo SPT, si bien hoy en día, con el avance de los estudios, se prefiere estimar el potencial de licuefacción valiéndose de ensayos estáticos (CPT) o ensayos de medición de las ondas de cizalla Vs. Estos métodos son utilizados generalmente para proyectar obras de mediana importancia.

**Seed e Idriss (1971b)**, para poder determinar los esfuerzos de corte inducidos por un sismo, los autores proponen un procedimiento sencillo basado en la hipótesis de suelo homogéneo. Suponiendo la propagación vertical de ondas sísmicas de corte, una columna de terreno de altura  $z$  (Figura 1) se mueve rígidamente en dirección horizontal y por lo tanto el esfuerzo de corte máximo en una profundidad  $z$  está dado por:

$$\tau_{max} = \frac{a_{max}}{g} \cdot \gamma \cdot z$$

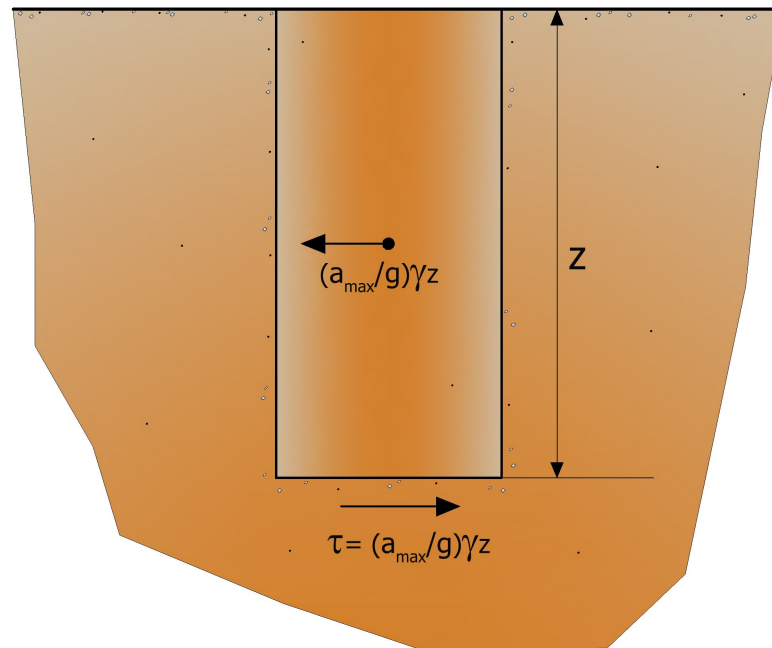
Donde  $a_{max}$  es la aceleración máxima en superficie,  $g$  la aceleración de gravedad e  $\gamma$  el peso de volumen seco del terreno.

Dado que en la práctica el terreno es deformable, el esfuerzo de corte es menor que en la suposición de un cuerpo rígido y por lo tanto se vuelve necesario introducir un coeficiente reductor  $r_d$ . Normalizando con la presión vertical efectiva y refiriéndonos a un valor medio  $\tau_{av}$  en vez de un valor máximo  $\tau_{max}$  se obtiene:

$$\frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = CSR_{7.5} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d$$

Tal expresión es válida para eventos sísmicos de magnitud 7,5. Para otras magnitudes se debe dividir la razón de Tensiones Cíclicas entre el factor de corrección **MSF** (*Magnitudo Scaling Factor*):

$$CSR = \frac{CSR_{7.5}}{MSF}$$



**Figura 1** – Esfuerzo de corte inducido por un sismo a profundidad "z"

### 3.1.2 Seed e Idriss

El método de **Seed e Idriss (1982)** calcula el Coeficiente de Tensión Cíclica con la siguiente relación:

$$\frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = CSR_{7.5} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d$$

Para determinar el valor del coeficiente reductor  $r_d$  se utiliza la fórmula empírica propuesta por **Iwasaki et al. (1978)**:

$$r_d = 1 - 0.015z$$

Mientras que para el factor de corrección MSF se hace referencia a los valores presentados en la Tabla 1, obtenidos de varios estudios, entre los cuales **Seed H. B. e Idriss I. M (1982)**

**Tabla 1-** Factor de escala de la magnitud según varios investigadores



<i>Magnitud</i>	<i>Seed H.B. &amp; Idriss I.M. (1982)</i>	<i>Ambraseys N.N (1988)</i>	<i>NCEER (Seed R. B. et alii) (1997; 2003)</i>
5,5	1,43	2,86	2,21
6,0	1,32	2,20	1,77
6,5	1,19	1,69	1,44
7,0	1,08	1,30	1,19
7,5	1,00	1,00	1,00
8,0	0,94	0,67	0,84
8,5	0,89	0,44	0,73

La Razón de Resistencia Cíclica **CRR**, se calcula en función de la magnitud, del número de golpes en el ensayo SPT, de la presión vertical efectiva, de la densidad relativa.

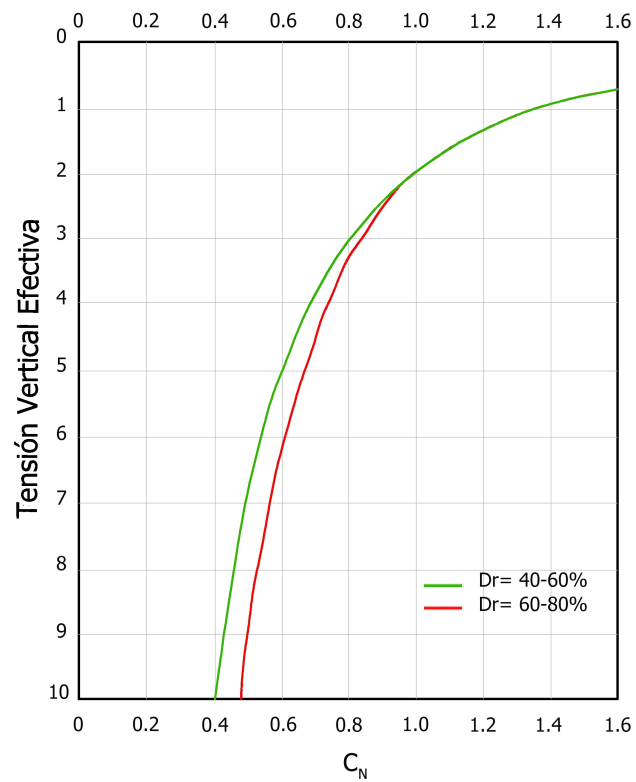
Se calcula inicialmente el número de golpes corregido en la cota deseada para tener en cuenta la presión litostática mediante la siguiente expresión:

$$(N_{1.60}) = C_N \cdot N_m$$

Donde  $N_m$  es el número promedio de golpes en el ensayo penetrométrico estándar SPT y  $C_N$  un coeficiente de corrección que se determina con la razón:

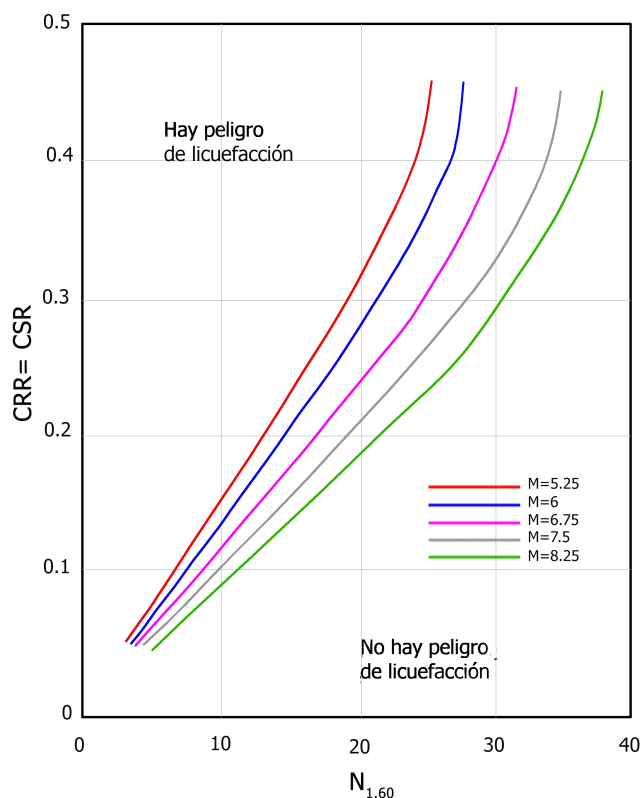
$$C_N = \left( \frac{Pa}{\sigma'_{v0}} \right)^n$$

Donde  $\sigma'_{v0}$  es la presión vertical efectiva,  $Pa$  la presión atmosférica ( $\sim 100$  kPa) expresada en las mismas unidades de  $\sigma'_{v0}$  y  $n$  un exponente que depende de la densidad relativa del terreno (Figura 1).



**Figura 1** – Coeficiente de corrección  $C_N$

Se calcula la razón de resistencia cíclica CRR del abanico mostrado en la Figura 2 que representa el conjunto de los valores umbrales (separación entre licuefacción y no licuefacción) con una cierta magnitud.



**Figura 2** – Correlación entre CRR y  $N_{1,60}$

Ha sido demostrado que para un sismo de magnitud igual a 7,5 CRR se puede indicar con la siguiente expresión:

$$CRR \approx \frac{N_{1,60}}{90}$$

Aplicando la siguiente relación se determina el factor de seguridad a la licuefacción **FS**:

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

si  $F_S > 1,3$  el depósito no es licuefactible.

Los autores han precisado que este procedimiento es válido para arenas con  $D_{50} > 0,25$  mm; para arenas limosas y limos. Sugieren corregir el valor de  $N_{1,60}$  utilizando la siguiente fórmula:

$$(N_{1,60})_{CS} = N_{1,60} + 7.5$$

### 3.1.3 Iwasaki et alii

Este método fue desarrollado basándose en la observación del hecho que la severidad de los daños que la licuefacción ocasiona en las obras está relacionada con el volumen de terreno licuado en el depósito.

El método se basa en la estimación de dos cantidades: el factor de resistencia (FS) y el Índice de licuefacción (IL). El índice de licuefacción IL, indicativo de la extensión que el fenómeno de licuefacción puede experimentar dentro del depósito, deriva de la siguiente expresión:

$$I_L = \int_0^{20} F(z) \cdot W(z) dz$$

donde:

$$F = 1 - F_s \quad \text{para } F_s \leq 1$$

$$F = 0 \quad \text{para } F_s > 1$$

$$W(z) = 10 - 0.5 \cdot z$$

La razón de tensiones cíclicas (**CSR**) para eventos sísmicos con magnitud 7,5 se obtiene con el método de Seed e Idriss (1982).

Mientras que para calcular la resistencia **CRR** se proponen las siguientes expresiones, obtenidas de varias pruebas de resistencia cíclica no drenada:

- Para terrenos con  $0,04 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0,6$ :

$$CRR = 0.0882 \sqrt{\frac{N_m}{\sigma'_{v0} + 0.7}} + 0.225 \log_{10} \left( \frac{0.35}{D_{50}} \right)$$

- Para terrenos con  $0,6 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 1,5$ :

$$CRR = 0.0882 \sqrt{\frac{N_m}{\sigma'_{v0} + 0.7}} - 0.05$$

donde:

$D_{50}$  es el diámetro de los gránulos al 50% (en mm) y  $N_m$  es el número promedio de golpes del ensayo penetrométrico estándar SPT.

La clasificación del riesgo de licuefacción con el método de **Iwasaki et alii** se presenta en la tabla 2.

Tabla 2- Clase de riesgo

$I_L$	Riesgo de licuefacción
$IL = 0$	1,43
$0 < IL \leq 5$	1,32
$5 < IL \leq 15$	1,19
$15 < IL$	1,08

### 3.1.4 Tokimatsu e Yoshimi

Para tener en cuenta la magnitud del terremoto, el método de **Tokimatsu e Yoshimi (1983)**, a diferencia de los métodos anteriores, calcula la relación de tensión cíclica con la siguiente expresión:

$$CSR = 0.65 \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d \cdot r_n$$

En la cual se introduce un coeficiente correctivo  $r_n$  función de la magnitud  $M$ .

$$r_n = 0.1 \cdot (M - 1)$$

La resistencia a la licuefacción se obtiene de la siguiente expresión:

$$CRR = a \cdot C_r \left[ \frac{16 \sqrt{N_{1.60} + \Delta N_f}}{100} + \left( \frac{16 \sqrt{N_{1.60} + \Delta N_f}}{C_s} \right) \right]$$

donde:

$$a = 0,45.$$

$$C_r = 0,57.$$

$$n = 14.$$

$$\Delta N_f = 0 \text{ para arenas limpias y } \Delta N_f = 5 \text{ para arenas limosas}$$

$$N_{1,60} = [1,7 / (\sigma'_{v0} + 0,7)] N_m$$

Cs es una constante empírica que depende de la amplitud de la deformación de corte.

Los autores llegaron a esta relación correlacionando los resultados de pruebas triaxiales cíclicas con los resultados de ensayos penetrométricos estándar SPT.

Afectos del proyecto, los autores sugieren adoptar un valor de FS > 1,5 para arenas medianamente sueltas y FS > 1,3 para arenas medianamente densas.

### 3.1.5 Finn

**Finn** (1985) propone una correlación entre la resistencia a la licuefacción y la magnitud y sugiere una expresión de **CRR** en función de la magnitud **M** y del número de golpes corregido **N<sub>1,60</sub>**:

$$CRR = \frac{N_{1,60}}{12.9M - 15.7}$$

**F<sub>s</sub>** se obtiene mediante la siguiente expresión:

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

Para el cálculo de la razón de resistencia cíclica **CSR** se utiliza la expresión de **Seed e Idriss** (1982) donde el coeficiente de reducción  $r_d$  se determina con la fórmula empírica propuesta por **Iwasaki et al.** (1978)

### 3.1.6 Cortè

Para el cálculo de la razón de resistencia cíclica **CRR**, **Cortè** propone dos relaciones en función del parámetro **D<sub>50</sub>**:

- Para terrenos con  $0,04 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0,6$ :

$$CRR = \left\{ \left[ \frac{N_m}{\sigma'_{v0} + 70} \right]^{0.5} - 0.258 \log_{10} \left( \frac{D_{50}}{0.35} \right) \right\}$$

- Para terrenos con  $0,6 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 1,5$ :

$$CRR = \left\{ \left[ \frac{N_m}{\sigma'_{v0} + 70} \right]^{0.5} - 0.0567 \right\}$$

El coeficiente A asume valores que varían entre 0,50 y 0,66, según la magnitud del sismo y del número de ciclos equivalentes, los que a su vez varían entre 5 e 20.

El cálculo de la relación de tensión cíclica **CSR** se lleva a cabo con la expresión de **Seed e Idriss (1982)** donde el coeficiente de reductivo  $r_d$  se determina con la fórmula empírica propuesta por **Iwasaki et al. (1978)**

### 3.1.7 Robertson e Wride

El método de Robertson y Wride utiliza el índice de comportamiento para suelos de tipo IC que se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$I_c = \left[ 3.47 - \log_{10} Q \right]^2 + \left( \log_{10} R_f + 1.22 \right)^2 \Bigg]^5$$

$$Q = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{Pa} \left( \frac{Pa}{\sigma'_{v0}} \right)^n$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} 100$$

donde:

$q_c$  es la resistencia a la punta.

$Pa$  es la tensión de referencia (1 atmósfera) en la mismas unidades de  $\sigma'_{v0}$ .

$f_s$  es la fricción del manguito.

$n$  es un exponente que depende del tipo de suelo.

Inicialmente se asume  $n = 1$ , como para suelo arcilloso y se procede al cálculo de  $I_c$  con la fórmula anterior.

Si  $I_c > 2,6$  probablemente el suelo es tipo arcilloso y el análisis de detiene. El terreno non se considera con riesgo de licuefacción.

Si  $I_c \leq 2,6$ , significa que el presupuesto es errado, el suelo es granular,  $Q$  se vuelve a calcular utilizando la relación anterior y usando como exponente  $n = 0,5$ .

Si aún así  $I_c \leq 2,6$ , significa que el presupuesto es correcto y que el suelo es probablemente no plástico y granular.

Si en cambio  $I_c > 2,6$ , quiere decir que el presupuesto es de nuevo errado y que el suelo es probablemente limoso.  $Q$  se debe calcular nuevamente desde (b) poniendo  $n = 0,75$ .

Ya calculado  $I_c$ , se procede con la corrección de la resistencia a la punta  $q_c$  mediante la siguiente expresión:

$$q_{c1N} = \frac{q_c}{Pa} \left( \frac{Pa}{\sigma'_{v0}} \right)^n$$

Donde el exponente de esfuerzo  $n$  es el mismo utilizado en el cálculo de  $I_c$ .

La corrección a la resistencia a la punta debida al contenido de material fino se determina con el siguiente procedimiento:

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c \cdot q_{c1N}$$

$$K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88$$

La resistencia alla liquefazione per una magnitudo pari a 7,5 (CRR7,5) si calcola nel modo seguente:

- si  $(q_{c1N})_{cs} < 50$ :

$$CRR = 0.833 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right] + 0.05$$

- si  $50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160$ :



$$CRR = 93 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right] + 0.08$$

La Relación de Tensión Cíclica **CSR** se calcula con la fórmula presentada en la **Introducción a los métodos simplificados** de esta Guía. Para otras magnitudes se debe hacer la corrección con el factor correctivo **MSF** tal como como sugiere el **NCEER** (véase Tabla 1 - método Seed Idriss).

Para determinar el valor del coeficiente de reducción  $r_d$  se utilizan las fórmulas recomendadas por un equipo de expertos del **NCEER** (*National Center for Earthquake Engineering Research*) :

se  $z < 9,15$  m:

$$r_d = 1.0 - 0.00765 \cdot z$$

se  $9,15 \leq z < 23$  m:

$$r_d = 1.174 - 0.00267 \cdot z$$

donde  $z$  es la profundidad, expresada en metros.

### 3.1.8 Robertson e Wride modificado

En el método de **Robertson y Wride modificado**, la corrección a la resistencia a la punta debida al contenido de material fino se determina con el siguiente procedimiento:

$$(q_{c1N})_{cs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

$$\Delta q_{c1N} = \frac{K_c}{1 - K_c} q_{c1N}$$

donde  $K_c$  depende del contenido de finos, FC (%):

$$\begin{aligned}
 k_c &= 0 && \text{para } FC \leq 5 \\
 k_c &= 0.0267(FC - 5) && \text{para } 5 < FC \leq 35 \\
 k_c &= 0.8 && \text{para } FC > 35
 \end{aligned}$$

FC (%) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$FC (\%) = 1.75(I_c)^{3.25} - 3.7$$

La resistencia a la licuefacción para una magnitud de 7,5 (**CRR<sub>7,5</sub>**) se calcula de la siguiente manera:

si  $(q_{c1N})_{cs} < 50$

$$CRR = 0.833 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right] + 0.05$$

si  $50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160$

$$CRR = 93 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.08$$

La Relación de Tensión Cíclica **CSR** se calcula con la fórmula presentada en la **Introducción a los métodos simplificados** de esta Guía. Para otras magnitudes se debe hacer la corrección con el factor correctivo **MSF** tal como sugiere el **NCEER** (véase Tabla 1 - método Seed Idriss).

Para determinar el valor del coeficiente de reducción  $r_d$  se utilizan las fórmulas recomendadas por un equipo de expertos del **NCEER** (*National Center for Earthquake Engineering Research*) :

si  $z < 9,15$  m:

$$r_d = 1.0 - 0.00765 \cdot z$$

si  $9,15 \leq z < 23$  m:

$$r_d = 1.174 - 0.00267 \cdot z$$

donde  $z$  es la profundidad, expresada en metros.

### 3.1.9 Idriss e Boulanger (2008)

En el método propuesto por **Idriss y Boulanger** el índice de comportamiento  $I_c$  para el tipo de suelo se obtiene con las siguientes fórmulas:

$$I_c = \left[ 3.47 - \log_{10} Q \right]^2 + \left( \log_{10} R_f + 1.22 \right)^2 \Bigg]^{0.5}$$

$$Q = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{Pa} \left( \frac{Pa}{\sigma'_{v0}} \right)^n$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} 100$$

Donde:

$q_c$  es la resistencia de punta.

$Pa$  es la tensión de referencia (1 atmosfera) en las mismas unidades de  $\sigma'_{v0}$ .

$f_s$  es la fricción del manguito.

$n$  es un exponente que depende del tipo de suelo.

donde  $n$  se determina de modo iterativo con la siguiente relación:

$$n = 1.338 - 0.249 q_{c1N}^{0.264}$$

La corrección de la resistencia de punta debida al contenido de material fino se estima mediante:

Donde la fracción de finos  $FC(\%)$  se calcula mediante la siguiente expresión:

$$FS(\%) = 2.8 \cdot (I_c)^{2.60}$$

La resistencia a licuefacción para una magnitud de 7,5 (CRR7,5) se calcula:

$$CRR = \exp \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{540} + \left( \frac{(q_{c1N})_{cs}}{67} \right)^2 - \left( \frac{(q_{c1N})_{cs}}{80} \right)^3 + \left( \frac{(q_{c1N})_{cs}}{114} \right)^4 - 3 \right]$$

Para  $z_w > z$ , con  $z_w$  profundidad de nivel freático, y para  $(q_{c1N})_{cs} \leq 160$  el terreno no es licuefactible (NL).

La relación de esfuerzo cíclico **CSR** se calcula con la fórmula presentada en la **Introducción a los métodos simplificados** de esta Guía. Para determinar el valor del coeficiente reductor  $r_d$  se utilizan las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} r_d &= \exp\left[\left(\frac{z}{11,73} + 5,133\right) \cdot M\right] \\ &= -1,1012 - 1,126 \cdot \exp\left[\frac{z}{11,73} + 5,133\right] \\ &= 0,106 + 0,118 \cdot \exp\left[\frac{z}{11,28} + 5,142\right] \\ MSF &= 6,9 \cdot \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 0,058 \leq 1,8 \end{aligned}$$

El factor de seguridad a la licuefacción se define en el modo siguiente:

$$FS = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K$$

Para determinar el factor de escala de la magnitud **MSF**, la fórmula de **Idriss & Boulanger** utiliza la expresión:

$$MSF = 6,9 \cdot \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 0,058 \leq 1,8$$

El factor de corrección de la presión de confinamiento  $K_\sigma$  está dado por:

$$K = 1 - C \cdot \ln\left(\frac{v_0}{p_a}\right) \leq 1$$

$$C = \frac{1}{37,3 - 8,27 \cdot (q_{c1N})^{0,264}} \leq 0,3$$

### 3.1.10 Andrus e Stokoe

El método de **Andrus e Stokoe** se basa en resultados de ensayos sísmicos de refracción ( $V_s$ ).

La velocidad de las ondas de cizalla se corrige con la sobrepresión, usando la ecuación (Robertson et al., 1992):

$$V_{s1} = V_S \left( \frac{100}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25}$$

donde

$V_{s1}$  velocidad de las ondas de corte corregida de sobrepresión;

$V_S$  velocidad de las ondas de corte medida in situ;

$P_a$  presión atmosférica (aproximadamente 100 kPa);

$\sigma'_{v0}$  presión efectiva inicial en las mismas unidades de la  $P_a$ .

Para calcular la resistencia a la licuefacción, Andrus y Stokoe sugieren la siguiente relación:

$$CRR = 0.03 \cdot \left( \frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + 0.9 \cdot \left[ \frac{1}{(V_{s1})_{cs} - V_{s1}} - \frac{1}{(V_{s1})_{cs}} \right]$$

donde la presencia de finos FC (%) interviene en el modelo de cálculo a través de las siguientes indicaciones:

$$\begin{aligned} (V_{s1})_{cs} &= 220 && \text{per } FC \leq 5\% \\ 220 < (V_{s1})_{cs} &\leq 200 && \text{per } 5\% < FC \leq 35\% \\ (V_{s1})_{cs} &= 200 && \text{per } FC > 35\% \end{aligned}$$

La Relación de Tensión Cíclica **CSR** se calcula con la fórmula presentada en la **Introducción a los métodos simplificados** de esta Guía. Para otras magnitudes se debe hacer la corrección con el factor correctivo **MSF** tal como como sugiere el **NCEER** (véase Tabla 1 - método Seed Idriss).

### 3.1.11 NTC 2008

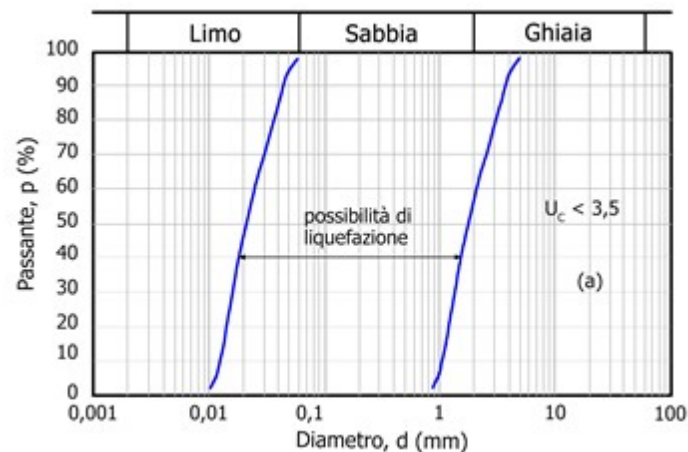
Rispetto alla normativa europea, la normativa italiana (NTC 2008) è meno accurata e non fornisce proposte di metodologie per valutare il potenziale di liquefazione.

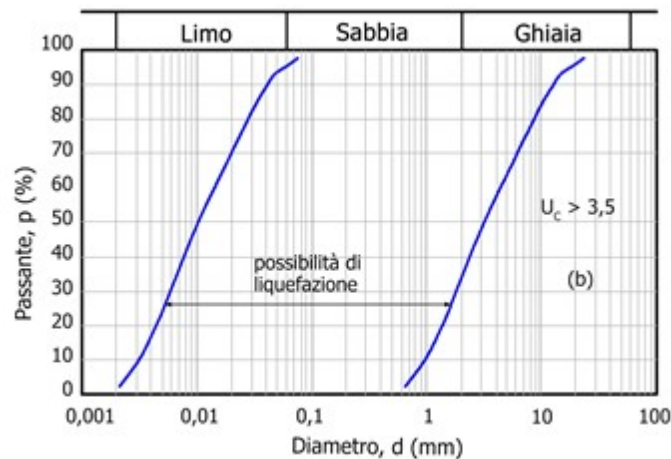
La normativa richiede che il controllo della possibilità di liquefazione venga effettuato quando la falda freatica si trova in prossimità della superficie ed il terreno di fondazione comprende strati estesi o lenti spesse di

sabbie sciolte sotto falda, anche se contenenti una frazione fine limo-argillosa.

La normativa esclude il pericolo di liquefazione quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

- eventi sismici attesi di magnitudo  $M$  inferiore a 5;
- accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1;
- profondità media stagionale della falda maggiore di 15m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- depositi costituite da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $N_{1,60} > 30$  oppure  $q_{c1N} > 180$ , dove  $N_{1,60}$  è il valore della resistenza determinata da prove SPT normalizzata ad una tensione verticale efficace di 100 kPa e dove  $q_{c1N}$  è il valore della resistenza determinata da prove CPT normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
- distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate in Figura 4(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3,5$  ed in Figura 4(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3,5$ .





**Figura4-** Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione

Quando nessuna delle condizioni precedenti risulti soddisfatta, come la normativa europea, quella italiana ritiene che la suscettibilità a liquefazione deve essere verificata come minimo mediante i metodi generalmente accettati dall'ingegneria geotecnica, basati su correlazioni di campagna tra misure in situ e valori critici dello sforzo ciclico di taglio che hanno causato liquefazione durante terremoti passati.

Come la normativa europea, quella italiana ritiene che la suscettibilità a liquefazione deve essere verificata come minimo mediante i metodi generalmente accettati dall'ingegneria geotecnica, basati su correlazioni di campagna tra misure in situ e valori critici dello sforzo ciclico di taglio che hanno causato liquefazione durante terremoti passati.

Lo sforzo ciclico di taglio **CSR** viene stimato con l'espressione semplificata:

$$CSR = 0.65 \frac{a_g \cdot S}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \frac{r_d}{MSF} \frac{1}{K_\sigma}$$

dove  $a_g$  rappresenta l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido orizzontale ed  $S$  è un coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche.

Il coefficiente riduttivo  $r_d$  viene valutato secondo quanto proposto da Idriss (1999):

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z)M]$$

$$(z) = -1,012 - 1,126 \operatorname{sen} \left[ \left( \frac{z}{11,73} \right) + 5,133 \right]$$

$$(z) = 0,106 + 0,118 \operatorname{sen} \left[ \left( \frac{z}{11,28} \right) + 5,142 \right]$$

con **M** si indica la magnitudo momento.

Laddove il terremoto atteso nell'area sia caratterizzato da una magnitudo con momento **M** diverso da 7,5 occorre rivalutare la sollecitazione sismica introducendo un coefficiente correttivo **MSF**, nel metodo proposto si fa riferimento ai valori suggeriti dal **NCEER** riportati nell' **Introduzione ai metodi semplificati** di questa Guida.

$K_\sigma$  è un fattore di correzione della tensione litostatica compreso fra 1 e 1,5 (Olsen, 1984):

$$K_\sigma = 1 \quad \text{per } \sigma'_{v0} < 100$$

$$K_\sigma = (\sigma'_{v0}/100)^{(f-1)} \quad \text{per } \sigma'_{v0} \geq 100$$

dove  $f$  è un parametro funzione di  $(N_{1,60})$  e  $\sigma'_{v0}$ .

La resistenza alla liquefazione viene calcolata in funzione di parametri desunti da prove SPT attraverso le seguenti espressioni:

$$CRR = \frac{1}{[34 - (N_{1,60})_{cs}]} \frac{(N_{1,60})_{cs}}{135} + \frac{50}{[10 (N_{1,60})_{cs} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

$$(N_{1,60})_{cs} = \alpha + \beta N_{1,60}$$

$$N_{1,60} = C_N C_E C_R C_S C_B N_m$$

$$C_N = \left( \frac{100}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5}$$

$$C_E = \frac{ER}{60}$$

dove **ER** è pari al (rapporto dell'energia misurato rispetto al valore teorico) x 100 e dipende dal tipo di strumento utilizzato (Tabella 2).

**Tabella 2-** Fattore di scala della magnitudo derivato da diversi ricercatori

Attrezzatura	$C_E$
Safety Hammer	0,7 <sub>s</sub> , 1,2
Donut Hammer (USA)	0,5 <sub>s</sub> , 1,0
Donut Hammer (Giappone)	1,1 <sub>s</sub> , 1,4



Attrezzatura	$C_E$
Automatico-Trip Hammer (Tipo Donut o Safety)	0,8 , 1,4

I parametri  $\alpha$  e  $\beta$ , invece, dipendono dalla frazione fine FC:

$\alpha = 0$	per $FC \leq 5\%$
$\alpha = \exp[1,76 - (190 / FC^2)]$	per $5\% < FC \leq 35\%$
$\alpha = 5$	per $FC > 35\%$
$\beta = 1,0$	per $FC \leq 5\%$
$\beta = [0,99 + (FC \cdot 1,5 / 1000)]$	per $5\% < FC \leq 35\%$
$\beta = 1,2$	per $FC > 35\%$

$C_R$  è un fattore di correzione per la lunghezza  $L$  delle aste della prova, i valori suggeriti si riportano in Tabella 3:

**Tabella 3-** Fattore di correzione da applicare in funzione della lunghezza delle aste dello strumento

$L$	$C_R$
$\leq 3$	0,75
$3 < L \leq 4$	0,80
$4 < L \leq 6$	0,85
$6 < L \leq 10$	0,95
$> 10$	1,00

$C_S$  è un fattore di correzione per il tipo di campionatore:

per campionatori di tipo standard  $C_S$  è sempre uguale a 1,0

per campionatori di tipo non-standard  $C_S$  è compreso fra 1,1 e 1,3

$C_B$  è un fattore di correzione per il diametro del foro di sondaggio, assume i valori riportati in Tabella 4.

**Tabella 4-** Fattore di correzione per il diametro del foro di sondaggio

Diametro foro	$C_B$
$\leq 3$	0,75
$3 < L \leq 4$	0,80
$4 < L \leq 6$	0,85
$6 < L \leq 10$	0,95
$> 10$	1,00

Secondo la normativa è suscettibile di liquefazione un terreno in cui lo sforzo di taglio generato dal terremoto supera l'80% dello sforzo critico che ha provocato liquefazione durante terremoti passati e quindi deve essere  $F_s \leq 1,25$ .

La probabilidad de licuefacción  $P_L$ , invece, è data dall'espressione di **Juang et alii** (2001):

$$P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_S}{0,72}\right)^{3,1}}$$

### 3.1.12 EC8

Las directrices de la normativa europea están contenidas en el punto 4.1.3 al cual se agregan otras indicaciones que se pueden encontrar en el anejo B de la parte 5 del Euro código 8 (ENV 1998-5).

Según esta normativa se puede no tener en cuenta el peligro de licuefacción en los suelos arenosos saturados que se encuentran a una profundidad de 15 m o cuando  $a_g < 0,15$  y, contemporáneamente, el terreno satisfaga al menos una de las condiciones siguientes:

- Contenido de arcilla mayor del 20%, con un índice de plasticidad  $> 10$ ;
- Contenido de limo superior al 10% y resistencia  $N_{1,60} > 20$ ;
- Fracción de finos irrelevante y resistencia  $N_{1,60} > 25$ .

En general, el método es válido si  $N_{1,60} < 30$ . Para  $N_{1,60} > 30$ , los suelos se clasifican como no licuefactibles (suelos granulares limpios densos).

Cuando no se cumpla ninguna de las condiciones anteriores, *el peligro de licuefacción se debe evaluar como mínimo mediante los métodos usuales en ingeniería geotécnica, basados en correlaciones entre las mediciones in situ y las tensiones tangenciales cíclicas críticas que han causado licuefacción en terremotos anteriores.*

El esfuerzo cíclico de corte CSR se estima con la expresión simplificada:

$$CSR = 0.65 \frac{a_g}{g} \cdot S \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \frac{r_d}{MSF}$$

Donde S es el coeficiente de perfil estratigráfico, definido como sigue:

**Tabla 1-** Coeficientes de perfil estratigráfico

Categoría suelo	Espectros de Tipo 1 S (M > 5,5)	Espectros de Tipo 2 S (M ≤ 5,5)
A	1,00	1,00
B	1,20	1,35
C	1,15	1,50
D	1,35	1,80
E	1,40	1,60

El factor de corrección de la magnitud MSF que sugiere la normativa es el de **Ambraseys** (Tabla 1-método Seed Idriss).

En caso de utilizar datos provenientes de ensayos SPT la resistencia a la licuefacción se calcula mediante la siguiente relación de **Blake**, 1997:

$$CRR = \frac{0,04844 - 0,004721 (N_{1,60})_{cs} + 0,0006136 [(N_{1,60})_{cs}] - 0,00001673 [(N_{1,60})_{cs}]}{1 - 0,1248 (N_{1,60})_{cs} + 0,009578 [(N_{1,60})_{cs}] - 0,0003285 [(N_{1,60})_{cs}] + 0,000003714 [(N_{1,60})_{cs}]}$$

Donde  $(N_{1,60})_{cs}$  se calcula con el método propuesto por **Youd e Idriss (1997)**, recomendado por el **NCEER**:

$$(N_{1,60})_{cs} = \alpha + \beta N_{1,60}$$

Donde  $N_{1,60}$  es la normalización de los valores medidos del índice  $N_m$  (reducidos en un 25% a profundidad < 3 m) en el ensayo **SPT** respecto a una presión efectiva de confinamiento de 100 KPa y a un valor de la relación entre la energía de impacto y la energía teórica de caída libre igual al 60%, o sea:

$$N_{1,60} = C_N C_E N_m$$

$$C_N = \left( \frac{100}{v_o} \right)^{0,5}$$

$$C_E = \frac{ER}{60}$$

$$C_E = \frac{ER}{60}$$

Donde **ER** es igual al (relación de la energía medida con respecto al valor teórico) x 100 y depende del tipo de equipo utilizado (véase Tabla 2-método NTC 2008).

En cambio, los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , dependen de la fracción finos FC:

$\alpha = 0$	con $FC \leq 5\%$
$\alpha = \exp[1,76 - (190 / FC^2)]$	con $5\% < FC \leq 35\%$
$\alpha = 5$	con $FC > 35\%$
$\beta = 1,0$	con $FC \leq 5\%$
$\beta = [0,99 + (FC^{1,5} / 1000)]$	con $5\% < FC \leq 35\%$
$\beta = 1,2$	con $FC > 35\%$

En los siguientes casos, el suelo **no es susceptible a la licuefacción**, el programa no aporta el factor de seguridad, pero (--):

1.  $a_{max} < 0,15$ , fracción de arcilla  $> 20$  e  $IP \Rightarrow 10$
2. Número del informe del CRR inferior a 0 (cero)
3.  $a_{max} < 0,15$ , fracción de arcilla  $> 20$

Si se emplean datos provenientes de un ensayo penetrométrico estático (CPT), los valores de resistencia a la punta  $q_c$  se deben normalizar con respecto a una presión efectiva de confinamiento igual a 100 KPa y se calculan mediante la siguiente relación:

$$q_{c1N} = \frac{q_c}{Pa} \left( \frac{Pa}{v_o} \right)^n$$

Tal como señala el **EC8**, cuando se cuenta con datos provenientes de un ensayo **CPT**, se puede utilizar la siguiente relación para derivar el valor de  $(N_{1,60})_{cs}$  :

$$\frac{(q_{c1N})_{cs}}{(N_{1,60})_{cs}} = 5$$

El valor de la resistencia a la licuefacción se determina por la relación de **Blake**, 1997. En cambio, cuando se cuenta con datos provenientes de ensayos de refracción sísmica, se calcula la velocidad de propagación normalizada con la relación de **Robertson et alii**, 1992:

$$V_{S1} = V_S \left( \frac{Pa}{v_o} \right)^{0,25}$$

En cuanto a la resistencia a la licuefacción se utiliza la fórmula de **Andrus y Stokoe** :

$$CRR = 0,03 \left( \frac{V_{S1}}{100} \right)^2 + 0,9 \left[ \frac{1}{(V_{S1})_{cs} - V_{S1}} - \frac{1}{(V_{S1})_{cs}} \right]$$

### 3.2 Limit State of Liquefaction C. Hsein Juang 2006

The limit state for liquefaction triggering is obtained using a neural network-based searching technique developed by **Juang et al. 2000b**. The technique involves the training of supervised feed-forward neural networks with the "full" database of case histories and its subsets or samples. The successfully trained neural network that generates the most accurate *input-output* relationship is adopted in the subsequent step for searching "data points" on the unknown boundary surface. Regression analyses of the searched data points, with some engineering judgment, yields the following empirical equation for liquefaction resistance:

$$\text{CRR} = \exp(-2.8781 + 0.000309 \cdot (\text{qc}_{1\text{N},\text{m}})^{1.81}) \quad (1)$$

where:

$\text{qc}_{1\text{N},\text{m}}$  = stress-normalized cone tip resistance  $\text{qc}_{1\text{N}}$  adjusted for the effect of "fines" on liquefaction thus,  $\text{qc}_{1\text{N},\text{m}} = K \cdot \text{qc}_{1\text{N}}$ .

The stress-normalized cone tip resistance  $\text{qc}_{1\text{N}}$  used herein follows the definition by **Idriss and Boulanger 2004**, although the difference between this definition and that by **Robertson and Wride 1998** is rather small for the cases examined.

$K$  is part of the regression model and expressed as:

$$\begin{aligned} K &= 1 \text{ for } I_c < 1.64 \quad (2) \\ &= 1 + 80.06 \cdot (I_c - 1.64) \cdot (\text{qc}_{1\text{N}})^{-1.2194} \quad \text{for } 1.64 < I_c < 2.38 \\ &= 1 + 59.24 \cdot (\text{qc}_{1\text{N}})^{-1.2194} \quad \text{for } I_c > 2.38 \end{aligned}$$

Both  $I_c$  and  $\text{qc}_{1\text{N}}$  in **Eqs. 2** are dimensionless. The term  $I_c$  in **Eqs. 2** is a variant of the soil behavior type index defined by **Lunne et al. 1997** and **Robertson and Wride 1998**, and updated in **Zhang et al. 2002**.

Although  $I_c$  was initially developed for soil classification, use of  $I_c$  to "gage" the effect of "fines" on liquefaction resistance is well accepted **Robertson and Wride 1998; Youd et al. 2001;**

As with any simplified methods that follow the general framework by **Seed and Idriss 1971**, CRR is defined as the critical CSR that causes liquefaction for a given soil. Thus, it is essential that the CRR equation has to be used along with the reference CSR equation. To use **Eq. 1** for determination of CRR, the following cyclic stress ratio model must be used:

$$CSR_{7.5\sigma} = 0.65 \cdot (\sigma_v / \sigma'_v) \cdot (a_{\max} / g) \cdot r_d \cdot (1 / MSF) \cdot (1 / K\sigma) \quad (3)$$

where:

$g$  = acceleration of gravity, which is the unit for  $a_{\max}$ ;

$r_d$  = depth-dependent shear stress reduction factor dimensionless;

$MSF$  = magnitude scaling factor dimensionless;

$K\sigma$  = overburden correction factor dimensionless for CSR.

In Eq. 3,  $CSR_{7.5\sigma}$  is the CSR defined by **Seed and Idriss 1971** adjusted to the conditions of  $M_w$  moment magnitude  $\leq 7.5$  and  $\sigma = 100$  kPa. Such adjustment makes it easier to process case histories from different earthquakes and with soils of concern at different overburden pressures **Juang et al. 2003**. It should be noted that in this paper, the terms  $r_d$ ,  $MSF$ , and  $K\sigma$  are calculated with the formulae recommended by **Idriss and Boulanger 2004** ;

The method C. **Hsein Juang** was implemented in software LIQUITER

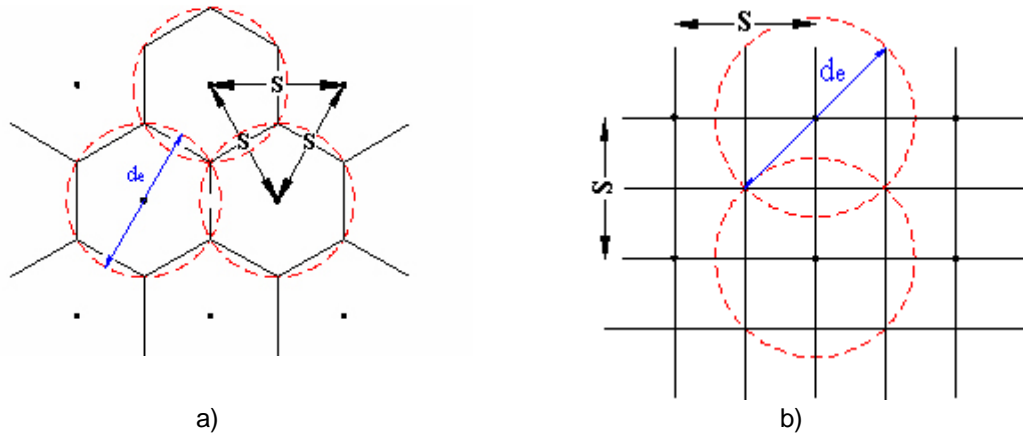
[More details](#)

### 3.3 Obras

#### 3.3.1 Drenes de grava

Se trata de columnas de grava introducidas en el estrato licuable, generalmente dispuestas en forma de tresbolillo (Figura 5 (a)), que es la

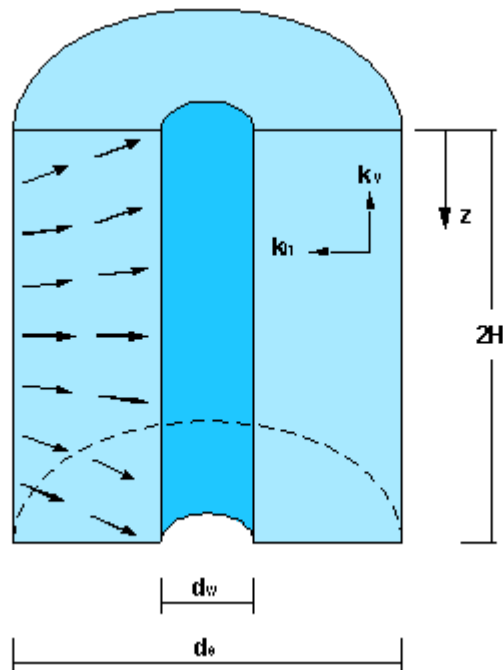
más económica. Sin embargo, se suelen disponer también en forma de malla cuadrada (Figura 5(b)).



**Figura 5** – Disposición de los drenes: a) Distribución triangular (en forma de tresbolillo); b) Distribución en forma de malla cuadrada.

**S** indica el espaciado entre las columnas, mientras **d<sub>e</sub>** indica el diámetro equivalente del cilindro de terreno que drena.

En todo caso, el problema a resolver se puede representar como un cilindro equivalente de terreno (Figura 6), con la superficie lateral externa impermeable y un dren central.



**Figura 6** – Esquema del cilindro equivalente de terreno drenado.

- $d_w$  = diámetro del dren;
- $d_e$  = diámetro equivalente del cilindro de terreno que drena;
- $k_h$  = permeabilidad en dirección horizontal;
- $k_v$  = permeabilidad en dirección vertical;
- $2H$  = altura del dren;
- $z$  = profundidad relativa.

El diámetro equivalente del cilindro de terreno que drena de es igual a 1,05 veces el intereje  $S$  de los drenes si estos están dispuestos en forma de tresbolillo e igual a **1,13 S** si están en forma de malla cuadrada.

Con la disposición en forma de malla cuadrada, es posible estimar el espaciado necesario para que llevar el índice de poros de un valor  $e_0$  a un valor  $e$  en forma aproximada con la siguiente expresión:

$$S = \left[ \frac{1 - e_0}{e_0 - e} \right]^{0,5} d_w$$

**Barron** (1948) fue el primero a elaborar una orgánica y completa disertación sobre el problema y en ella asume como válidos los supuestos de la teoría unidimensional de Terzaghi.

El grado de consolidación promedio  $U_h$  se calcula, por lo tanto, mediante la siguiente expresión:

$$U_h = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{F}\right)$$

donde  $T_h$  y  $F$  son, respectivamente, igual a:

$$T_h = \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{t}{m_v d_e^2}$$

$$F = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

donde:

- $m_v$  = coeficiente de compresibilidad volumétrica;
- $n$  = relación entre diámetro de y diámetro  $d_w$ ;
- $t$  =  $0,055 \exp(0,861M)$  duración del evento sísmico de proyecto;
- $M$  = magnitud del sismo de proyecto.



La magnitud del sismo de proyecto se calcula mediante la relación empírica de **Berardi et alii** que en los terremotos italianos se calibra:

$$\log R = 0,77 M - 3,6$$

donde **R** es la distancia epicentral del terremoto de proyecto en km.

Esta relación tiene el significado de mínima magnitud necesaria para producir la licuefacción de depósitos arenosos saturados superficiales recientes y permite trabajar en favor de la seguridad.

### 3.3.2 Heavy tamping

El método de heavy tamping consiste en producir un aumento de la densidad relativa de los suelos licuables mediante la caída libre, desde alturas de hasta 30-40 metros, de grandes bloques de hormigón o acero cuyo peso alcanza decenas de toneladas; provocando así ondas de compresión debidas a la repentina liberación de energía que generan un instantáneo aumento de la presión de poros, reduciendo la resistencia al corte provocando en el suelo una serie de licuefacciones sucesivas. Disipando la presión neutra en exceso, las partículas alcanzan configuraciones más estables.

Este procedimiento normalmente requiere 2-3 golpes por m<sup>2</sup>. Al final es recomendable efectuar un control, por ejemplo con ensayos penetrométricos, para verificar que el suelo haya efectivamente alcanzado un aumento de la densidad relativa. Los ensayos han de llegar a una profundidad de influencia de la densificación, función del peso de la maza **W** y de la altura de caída **H**, calculada mediante la expresión empírica:

$$D = (0,65 - 0,80)WH$$

donde **W** se mide en toneladas y **D** y **H** en metros.

El éxito de este método en suelos naturales no siempre está garantizado, especialmente cuando hay un porcentaje de finos superior al 10%, pero se han obtenido óptimos resultados en la densificación de descargas y terrenos de relleno.

El método de *heavy tamping* es rápido y sencillo, con un costo generalmente moderado, pero no debe ser utilizado en las cercanías de

construcciones, ya que las vibraciones ocasionan efectos nocivos en las mismas.

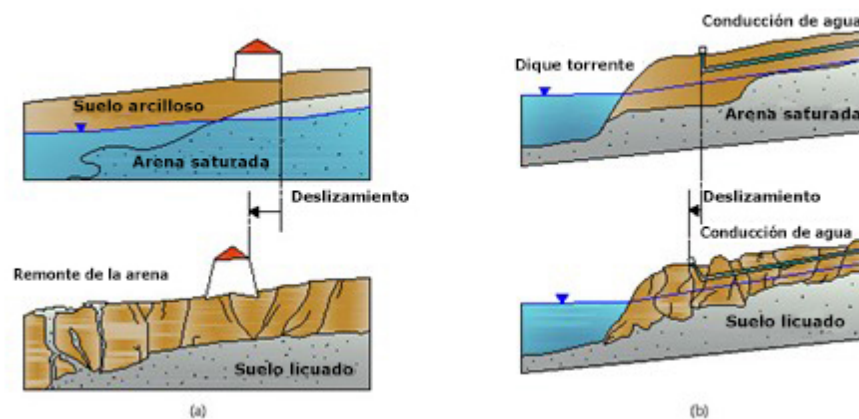
### 3.4 Lateral Spreading

#### 3.4.1 Lateral Spreading

La pérdida de resistencia en suelos granulares saturados debida al fenómeno de la licuefacción es causa de grandes deformaciones horizontales del terreno.

El Lateral spreading consiste en un movimiento lateral de grandes bloques de terreno por encima del nivel licuado, que se verifica cuando se cortan terrenos llanos o con leve inclinación ( $0^{\circ}$ -  $3^{\circ}$ ) de materiales aluviales.

La capa superior se fractura en bloques y así el material del estrato inferior (licuado) va a rellenar las fracturas. El suelo fracturado se mueve lateralmente hacia la superficie libre con corrimientos de hasta metros.



**Figura7-** Licuefacción del suelo con movimiento lateral (a), movimiento con frente de avance (b)

**Bartlett e Yound** (1995) presentaron dos modelos independientes para estimar el Lateral spreading (válidos para  $(N1)60$  menores a 15 o para una distancia de la fuente inferior a 30 Km):

- Modelo de superficie plana para áreas cercanas a diques;

$$\log\Delta h = -16.3658 + 1.178 \cdot M - 0.9275 \cdot \log r - 0.0133 \cdot r + 0.6572 \cdot \log W + 0.3483 \cdot \log H_{15} + 4.5270 \cdot \log(100 - F_{15}) - 0.9224 \cdot D_{50,15}$$

- Modelo de superficie inclinada para áreas con terrenos levemente inclinados.

$$\log\Delta h = -15.7870 + 1.1782 \cdot M - 0.9275 \cdot \log r - 0.0133 \cdot r + 0.4293 \cdot \log s + 0.3483 \cdot \log H_{15} + 4.5270 \cdot \log(100 - F_{15}) - 0.9224 \cdot D_{50,15}$$

Donde:

**Δh** = valor en metros del deslizamiento lateral del terreno;

**H<sub>15</sub>** = espesor acumulativo de los estratos saturados con número de golpes corregido,  $(N1)_{60}$ , menos de 15, se expresa en metros

**(D<sub>50</sub>)<sub>15</sub>** = dimensión media D<sub>50</sub> de los granulares incluso en H<sub>15</sub>, en milímetros;

**F<sub>15</sub>** = promedio del contenido de finos (fracción de sedimentos que pasan el tamiz n° 200) de los estratos en H<sub>15</sub>;

**M** = magnitud del terremoto

**R** = distancia horizontal de la fuente de energía sísmica;

**s** = inclinación del terreno;

**W** = relación entre la altura de la superficie libre (H) y la distancia entre el pie de la superficie libre y el sitio considerado (L).

Analizando casos históricos los autores **Bartlett e Yound** (1992) identificaron el campo de variación de las variables de las ecuaciones anteriores, necesarias para que se verifique el fenómeno del Lateral spreading (véase Tabla 6).

**Tabla 6-** Rango de los valores de las variables de las ecuaciones de **Bartlett e Yound** (1995)

Factor	Valores
Magnitud	1,6.0 < M < 8.0
Relación altura/distancia	1.0% < W < 20%
Inclinación del terreno	1.0% < s < 6%
Espesor del estrato suelto	0.3 < H15 < 6 m
Contenido de finos	0% < F15 < 50%
Dimensión promedio de los granos	0.1 mm < (D50)15 < 1 mm
Profundidad del fondo de la sección	< 15 m

Con el comando "**Lateral Spreading**", introduciendo los datos de input requeridos y presionando el botón "**Calcular**", el programa efectúa el cálculo del deslizamiento lateral utilizando los modelos de cálculo antes descritos.

Con el botón "**Report**" se prepara la impresión: contenidos teóricos y recapitulación de los datos de entrada y del resultado.

## 4 Bibliografía

- Ambraseys N. N.**, 1988. "Engineering Seismology". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 17, pp. 1-105.
- Andrus, R., Stokoe, K. H.**, 1997. "Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity", Proceedings of NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, National Center for Earthquake Engineering Research., State University of New York at Buffalo, 89-128.
- Andrus R. D., Stokoe K. H., II**, 2000. "Liquefaction resistance of soil from shear wave velocity", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 126, n. 11, pp. 1015-1025.
- Berardi R., Margottini C., Molin D., Parisi A.**, 1988. "Soil liquefaction case histories in Italy: preliminary data".
- Boulanger, R. W.**, 2003a. "Relating  $K_a$  to relative state parameter index." J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE 129(8), 770-73.
- Blake, T. F.**, 1997. Summary Report of Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Youd T. L., and Idriss I. M., eds., Technical Report NCEER 97-0022.
- Boulanger, R. W., and Idriss, I. M.** (2004). "State normalization of penetration resistances and the effect of overburden stress on liquefaction resistance." Proc., 11th Intl. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd Intl. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Doolin et al., eds, Stallion Press, Vol. 2, pp. 484-491.
- Cetin K.O., Seed R.B., Der Kiureghian A., Tokimatsu K., Harder L.F. Jr, Kayen R.E., Moss R.E.S.**, 2004. "SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 130(12), 1314-1340.

- Cetin, K. O., and Bilge, H. T., 2012.** "Performance-based assessment of magnitude (duration) scaling factors." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 138(3), 324–334.
- Cetin, K. O., Bilge, H. T., Wu, J., Kammerer, A. M., and Seed, R. B., 2009.** "Probabilistic models for cyclic straining of saturated clean sands." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(3), 371–386.
- Cetin, K. O., Bilge, H. T., Wu, J., Kammerer, A. M., and Seed, R. B., 2009.** "Probabilistic Model for the Assessment of Cyclically Induced Reconsolidation (Volumetric) Settlements." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(3), 387–398.
- Chinese Building Code, 1974.** "Earthquake resistant design code for industrial and civil buildings", TJ11-74, China Build. Publ. House, Pechino.
- C.N.R. Commissione Normativa del GNDT, 1984.** "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche".
- Crespellani T., Nardi R., Simoncini C., 1988.** "La liquefazione del terreno in condizioni sismiche" Zanichelli.
- Cortè J. F., 1985.** "L'evaluation du risque de liquefaction a partir des essais en place" in "Genie Parasismique", Presses Ponts et Chaussées.
- Durvill J. L., Meneroud J. P., Mouroux P., Simon J. M., 1985.** "Evaluation de l'aléa sismique local - microzonage" in "Genie Parasismique", Presses Ponts et Chaussées.
- Eurocode 8, 1988.** "Design provisions for earthquake resistance of structures - Part 1-1: generale rules for the representation of seismic actions" Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects.
- Finn W. D. L., 1985.** "Soil liquefaction: recent developments in practice" 2nd Int. Conf. on Soil Dyn. and Earthq. Eng., Southampton.
- Hamada, O'Rourke, and Bardet, 2003.** eds., Report MCEER-03-0003, MCEER, SUNY Buffalo, N.Y., 449-468.
- Hynes, M. E., and Olsen, R. S., 1999.** "Influence of confining stress on liquefaction resistance." Proc., Int. Workshop on Phys. And Mech. Of Soil Liquefaction, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 145-152.
- Idriss I. M. and Boulanger R. W., 2008.** Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261 pp.
- Idriss I. M., 1995.** H. B. Seed Memorial Lecture, Univ. of CA, Berkeley.
- Idriss I. M., 1999,** "An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential in Proceedings, TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction, Publication No. FHWA-RD-99-165, Federal Highway Administration, January.
- Idriss IM, Boulanger RW., 2004.** Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Proc., 11th International

- conference on soil dynamics and earthquake engineering, and 3rd International conference on earthquake geotechnical engineering, vol. 1. Stallion Press. p. 32–56.
- Idriss, I. M., and Boulanger, R. W., 2008.** Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261 pp.
- Ishihara, K., 1977.** "Simple Method of Analysis for Liquefaction of Sand Deposits During Earthquakes", *Soils and Foundations*, Vol. 17, No. 3, September 1977, pp. 117.
- Ishihara, K., and Yoshimine, M., 1992.** "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes." *Soils Found.*, 32(1), 173–188. JRA (1990) , Specification for Highway Bridges: Part V- Seismic Design. Japan Road Association, Tokyo.
- Ishihara, K., Shimuzu, K., and Yamada, Y., 1981.** "Pore Water Pressures Measured in Sand Deposits During an Earthquake", *Soils and Foundations*, Vol. 21, No. 4, pp. 85-100.
- Iwasaki T., Arakawa T., Tokida K., 1984.** "Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes", *Soil Dyn. and Earthq. Eng. Conf.*, Southampton, G.B. vol. 3, n. 1.
- Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., Yasuda S., 1978.** "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan", *II Int. Conf. on Microzon.*, Seattle.
- Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S. Yasuda S. Sato H., 1982.** "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods" *III Int. Conf. on Microzon.*, San Francisco.
- Juang, C. H., Fang, S. Y., Khor, E. H., 2006.** "First-Order Reliability Method for Probabilistic Liquefaction Triggering Analysis Using CPT", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(3), 337-350.
- Juang C. H., Jiang T., Andrus R. D., 2002.** "Assessing the probability-based methods for liquefaction potential evaluation", *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. n. 128, pp. 580-589
- Kayen, R. E, Mitchell, J. K., Seed, R. B., Lodge, A., Nishio, S., and Coutinho, R. (1992),** "Evaluation of SPT-, CPT-, and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using Loma Prieta data", *Proc., 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake-Resistant Des. Of Lifeline Fac. And Countermeasures for Soil Liquefaction*, Vol. 1, 177-204.
- Kuribayashi E., Tatsuoka F., 1975.** "Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan", *SF*, vol. 14, n. 4.
- Lancellotta R., 1995.** *Geotechnical Engineering*. Rotterdam: A.A. Balkema. 6ed.
- Liao, S. S. C., Veneziano, D., Whitman R.V., 1988.** "Regression Models for Evaluating Liquefaction Probability", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 4, pp. 389-409.

- Liao, S.S.C. and Whitman, R.V., 1986a.** "Overburden Correction Factors for SPT in Sand" *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 112, No. 3, p. 373 - 377.
- Liao, S.S.C. and Whitman, R.V., 1986b.** "Catalogue of A Liquefaction and NonLiquefaction Occurrences During Earthquakes" Research Report, Dept. of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, MA.
- Meyerhof, G. G., 1957.** Discussion on research on determining the density of sands by spoon penetration testing, in *Proceedings, 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, Vol. 3, p.110.
- Moss, R. S. E, Seed, R. B., Kayen, R. E., Stewart, J. P., Der Kiureghian A., Cetin, K. O. (2006)** "CPT-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of In Situ Seismic Soil Liquefaction Potential", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(8), 10321051.
- NCEER, 1997,** "Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", Edited by Youd, T. L., Idriss, I. M., Technical Report No. NCEER-97-0022, December 31.
- Peck, R B Hanson, W E & Thornburn, T H (1974)** *Foundation engineering* Pub: John Wiley, New York
- Robertson, P. K. and Wride, C. E., 1998.** "Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, 442 - 459.
- Robertson, P. K. Campanella, R. G., and Wightman, A. (1983).** "SPT CPT correlations", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109, No.11, 1449-1459.
- Robertson, P. K., Wride (Fear), C. E., 1998.** "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test", *Can. Geotech. J.* 35: 442-459.
- Robertson P. K., Woeller D. J., Finn W. D. L., 1992.** "Seismic Cone Penetration Test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 29, pp. 686-695
- Seed H. B., Idriss I. M., 1982.** "Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes", *Earthquake Engineering Research Institute Monograph Series*.
- Seed H. B., Idriss I. M., Arango I., 1983.** "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 458-482.
- Seed R. B., Chang S. W., Dickenson S. E., Bray J. D., 1997.** "Site-dependent seismic response including recent strong motion data" *Proc., Special Session on Earthquake Geotechnical Engineering, XIV Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Hamburg*, A. A. Balkema Publ., pp. 125-134.

- Seed R. B., Cetin K. O., Moss R. E. S., Kammerer A. M., Wu J., Pestana J. M., Riemer M. F., 2001.** "Recent advanced in soil liquefaction engineering and seismic site response evaluation" 4th Int. Conf. Recent Advanced in Geotechnical Earthquake Engineering and soil dynamics, San Diego, California.
- Seed R. B., Cetin K. O., Moss R. E. S., Kammerer A. M., Wu J., Pestana J. M., Riemer M. F, Sancio R. B., Bray J. D., Kayen R. E., Faris A., 2003.** "Recent advanced in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework" 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Keynote Presentation, H. M. S. Queen Mary, Long Beach, California
- Seed H.B. and Idriss I.M., 1971.** Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *J. Geotech. Egrg. Div, ASCE*, 97(9), 1249-1274.
- Seed, H. B., Idriss I. M., Arango I., 1983.** "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 109, No. 3, pp. 458-482.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Chung, R. M., 1984.** "The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations", *Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-84/15, University of California at Berkeley, October, 1984*
- Shamoto, Y., Zhang, J., and Tokimatsu, K., 1998.** "New charts for predicting large residual post-liquefaction ground deformation." *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 17\_7- 8\_, 427-438.
- Skempton, A.W. 1986.** Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique* 36(3): 425-447.
- Tokimatsu, K., and Seed, H. B. \_1984\_.** "Simplified procedures of the evaluation of settlements in clean sands." Rep. No. UCB/GT-84/16, Univ. of California, Berkeley, Calif.
- Youd T. L., Idriss I. M., eds., 1997.** NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils Technical Report NCEER 97-0022, Salt Lake City, UT, NCEER, Buffalo, NY, 276 p.
- Tokimatsu, K., and Seed, H. B., 1987.** Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking, *J. Geotechnical Eng., ASCE* 113 (GT8), 861-78.
- Tokimatsu K., Yoshimi Y., 1984.** "Criteria of soil liquefaction with SPT and fines content", VIII WCEE, San Francisco.
- Tokimatsu K., Yoshimi Y., 1983.** "Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-Value and fines content", *SF*, vol. 23, n. 4.
- Wu, J., Seed, R. B., and Pestana, J. M. (2003).** "Liquefaction triggering and post liquefaction deformations of Monterey sand under unidirectional



- cyclic simple shear loading." Geotechnical Engineering Research Rep. No. UCB/GE-2003/01, Univ. of California, Berkeley, Calif.
- Youd T. L., Noble, S. K.** 1997. "Liquefaction Criteria Based on Statistical and Probabilistic Analyses", Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, December 31, 1997, pp. 201-205.
- Youd T.L. and Hoose S.N.,** 1997. Liquefaction susceptibility and geologic setting. Proc., 6th World Conf. On Earthquake Engrg., Vol.3, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 2189-2194.
- Youd T.L. and Idriss I.M., eds.,** 1997. Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Nat. Ctr. For Earthquake Engrs., State Univ. of New York at Buffalo.
- Youd T.L. and Noble S.K,** 1997a. Magnitude scaling factors. Proc. NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Nat. Ctr. For Earthquake Engrg. Res., State Univ. of New York at Buffalo, 149-165.
- Youd T.L. and Noble S.K,** 1997b. Liquefaction criteria based on statistical and probabilistic analyses. Proc. NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Nat. Ctr. for Earthquake Engrg. Res., State Univ. of New York at Buffalo, 201-215.
- Youd T.L. and Perkins D.M,** 1978. Mapping of liquefaction-induced ground failure potential. J.Geotech. Emrg. Div., ASCE, 104(4), 433-446.
- Youd T.L., Idriaa, I.M., Andrus, R.D., Argano, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Liam Finn, W.D., Harder, L.F. Jr., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F. III., Martin G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed R.B., and Stokoe, K.H. II.,** 2001. "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 10, 819-833.
- Youd T.L., Kayen R.E. and Mitchell J.L.,** 1997. Liquefaction criteria based on energy content of seismograms. Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Nat. Ctr. For Earthquake Engrg. Res., State Univ. of New York at Buffalo, 217-224.
- Youd, T. L., Hansen, C. M., and Bartlett, S. F.,** 2002. Revised Multilinear regression equations for prediction of lateral spread displacement, J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng. 128(12),1007-017.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, E., Finn, W. D. L., Harder Jr., L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. 169 P., Liao, S. S. C., Marcusson III, W. F., Martin, G. R., Mtchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokoe II, K. H.,** 2001. "Liquefaction resistance of soils:

Summary report from the 1966 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils” J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., 124(10), 817-833.

Zhang G.; P. K. Robertson, M.ASCE; and R. W. I. Brachman, 2004. “Estimating Liquefaction-Induced Lateral Displacements Using the Standard Penetration Test or Cone Penetration Test, J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng. 130(8), 861871.

## 5 Geoapp

### **Geoapp: la suite más grande de la web para cálculos en línea**

Las aplicaciones que componen [Geostru Geoapp](#) han sido diseñadas para brindar soporte profesional en la solución de múltiples casos técnicos. Geoapp comprende más de 40 [aplicaciones](#) para: Ingeniería, Geología, Geofísica, Hidrología e Hidráulica.

La mayoría de las aplicaciones son gratuitas, mientras algunas requieren suscripción mensual o anual.

Suscribirse en Geoapp significa:

- usar aplicaciones profesionales en cualquier momento, lugar y dispositivo;
- guardar los archivos en la nube y en el propio PC;
- abrir los archivos para elaboraciones sucesivas;
- servicios de impresión de los informes y las elaboraciones gráficas;
- información sobre nuevas aplicaciones e inclusiones automáticas en la propia cuenta de usuario;
- disponibilidad de versiones siempre actualizadas;
- servicios de asistencia técnica por medio de Tickets.

### 5.1 Geoapp Section

#### **General e Ingeniería, Geotecnia y Geología**

Entre las aplicaciones presentes, se puede utilizar una amplia gama para **Liquiter**. Para este propósito, se recomiendan las siguientes aplicaciones:

- [Micropilotes](#)
- [Fòrmulas NSPT](#)
- [Tensiones litostáticas](#)
- [Coeficiente de reacción horizontal de pilotes de cimentación](#)
- [Licuefacción \(Boulanger 2014\)](#)
- [Tierras reforzadas](#)

## 6 Utility

### 6.1 Tablas de Conversión

Tabla de conversión de (°) a (%) y viceversa

Inclinación (%)	Ángulo (°)	Inclinación (%)	Ángulo (°)
1	0.5729	26	14.5742
2	1.1458	27	15.1096
3	1.7184	28	15.6422
4	2.2906	29	16.1722
5	2.8624	30	16.6992
6	3.4336	31	17.2234
7	4.0042	32	17.7447
8	4.5739	33	18.2629
9	5.1428	34	18.7780
10	5.7106	35	19.2900
11	6.2773	36	19.7989
12	6.8428	37	20.3045
13	7.4069	38	20.8068
14	7.9696	39	21.3058
15	8.5308	40	21.8014
16	9.0903	41	22.2936
17	9.6480	42	22.7824
18	10.2040	43	23.2677
19	10.7580	44	23.7495
20	11.3099	45	24.2277
21	11.8598	46	24.7024
22	12.4074	47	25.1735
23	12.9528	48	25.6410
24	13.4957	49	26.1049
25	14.0362	50	26.5651

Tabla de conversión de las fuerzas

De	A	Operación	Factor
N	kg	Dividir entre	9.8
kN	kg	Multiplicar por	102
kN	t	Dividir entre	9.8
kg	N	Multiplicar por	9.8
kg	kN	Dividir entre	102
t	kN	Multiplicar por	9.8

Conversión fuerzas:

1 Newton (N) = 1/9.81 Kg = 0.102 Kg ; 1 kN = 1000 N

### Tabla de conversión de las presiones

De	A	Operación	Factor
t/m <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	Dividir entre	10
kg/m <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	Dividir entre	10000
Pa	kg/cm <sup>2</sup>	Dividir entre	98000
kPa	kg/cm <sup>2</sup>	Dividir entre	98
Mpa	kg/cm <sup>2</sup>	Multiplicar por	10.2
kPa	kg/m <sup>2</sup>	Multiplicar por	102
Mpa	kg/m <sup>2</sup>	Multiplicar por	102000

## 6.2 Database Suelos

### Valores indicativos del peso de volumen en Kg/m<sup>3</sup>

Suelo	Valor mínimo	Valor máximo
Gravas secas	1800	2000
Gravas húmedas	1900	2100
Arena seca compacta	1700	2000
Arena húmeda compacta	1900	2100
Arena mojada compacta	2000	2200
Arena seca suelta	1500	1800
Arena húmeda suelta	1600	1900
Arena mojada suelta	1900	2100
Arcilla arenosa	1800	2200

Suelo	Valor mínimo	Valor máximo
Arcilla dura	2000	2100
Arcilla semisólida	1900	1950
Arcilla blanda	1800	1850
Turba	1000	1100

#### Valores indicativos del ángulo de rozamiento, en grados, en suelos

Suelo	Valor mínimo	Valor máximo
Gravas compactas	35	35
Gravas sueltas	34	35
Arena compacta	35	45
Arena suelta	25	35
Marga Arenosa	22	29
Marga grasa	16	22
Arcilla grasa	0	30
Arcilla arenosa	16	28
Limo	20	27

#### Valores indicativos de la cohesión en Kg/cm<sup>2</sup>

Suelo	Valor
Arcilla arenosa	0.20
Arcilla blanda	0.10
Arcilla plástica	0.25
Arcilla semisólida	0.50
Arcilla sólida	1
Arcilla tenaz	2÷10
Limo compacto	0.10

#### Valores indicativos del módulo elástico, en Kg/cm<sup>2</sup>

Suelo	Valor máximo de E	Valor mínimo de E
Arcilla muy blanda	153	20.4
Arcilla blanda	255	51
Arcilla media	510	153
Arcilla dura	1020	510
Arcilla arenosa	2550	255
Loess	612	153
Arena limosa	204	51

Suelo	Valor máximo de E	Valor mínimo de E
Arena suelta	255	102
Arena compacta	816	510
Pizarra	51000	1530
Limo	204	20.4
Arena y gravas sueltas	1530	510
Arena y gravas compactas	2040	1020

#### Valores indicativos del coeficiente de Poisson para suelos

Suelo	Valor máximo de $\mu$	Valor mínimo de $\mu$
Arcilla saturada	0.5	0.4
Arcilla no saturada	0.3	0.1
Arcilla arenosa	0.3	0.2
Limo	0.35	0.3
Arena	1.0	0.1
Arena gravosa comúnmente usada	0.4	0.3

#### Valores indicativos del peso específico de algunas rocas en Kg/m<sup>3</sup>

Roca	Valor mínimo	Valor máximo
Granito	45	60
Dolerita	55	60
Basalto	50	55
Arenisca	35	50
Pizarra	15	30
Caliza	35	50
Cuarcita	50	60
Mármol	35	50

#### Valores indicativos del módulo elástico y del coeficiente de Poisson en rocas

Roca	E	n
------	---	---

	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor mínimo</b>
Basalto	1071000	178500	0.32	0.27
Granito	856800	142800	0.30	0.26
Esquisto cristalino	856800	71400	0.22	0.18
Caliza	1071000	214200	0.45	0.24
Caliza porosa	856800	35700	0.45	0.35
Arenisca	428400	35700	0.45	0.20
Pizarra	214200	35700	0.45	0.25
Hormigón	Variable		0.15	

## 7 Contactos



Ofrecemos un servicio completo y de gran calidad de asistencia en las compras.

Para información gratuita en español sobre nuestros productos y servicio llamar

al número +506 83094208 (*horario de nuestra sede en Costa Rica*)

de las **9 AM a las 4 PM**, de **lunes a viernes**, o bien escribimos a [info.es@geostru.eu](mailto:info.es@geostru.eu).

–  
En Europa (+39) 6 90 28 90 85.