

ESTUDIO DEL RIESGO DE LICUACION PARA LA REPRESA DE RIO BLANCO. COMPARACION ENTRE METODOLOGIAS EXISTENTES

por: Américo L. Fernández¹ y Alan R. Crumley¹

Sumario

Los casos históricos de licuación comenzaron a hacerse cada vez más notables a partir del terremoto de Niigata en 1964. Desde de entonces innumerables metodologías han sido desarrolladas para tratar de definir el riesgo de licuación de un depósito de arenas saturadas. Una vez que se determina que existe riesgo de licuación en un depósito arenoso, hay dos aspectos fundamentales que deben tratar de controlarse: la pérdida de resistencia al corte y las grandes deformaciones debido a fallas de flujo. Estos efectos cobran mayor importancia cuando se trata de una represa, pues pueden poner en peligro la integridad y estabilidad de la misma. Por esto, se realizó un extenso estudio de licuación en el área de la futura represa de Río Blanco a fin de tratar de minimizar el riesgo de licuación en los estratos arenosos que yacen a lo largo de todo el eje de la represa.

1. Introducción

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de los análisis de licuación conducidos en las fundaciones de la futura presa de Río Blanco, localizada en Naguabo, Puerto Rico (ver **Figuras 1 y 2**). Los análisis efectuados corresponden a un enfoque de resistencia al esfuerzo cíclico, y están basados en ensayos de CPT (Cone Penetration Test). Mas aún, considerando la ubicación y la importancia de la presa de Río Blanco, una parte fundamental de su diseño será el estudio de la respuesta dinámica de los depósitos de suelo sometidos a una fuerte excitación de movimiento.

De acuerdo a la caracterización geotécnica del sitio de la presa, hay varias zonas de material granular alrededor y cerca del estribo izquierdo de la misma. La presencia de estas capas arenosas nos lleva a revisar, más cuidadosamente, dos factores importantes que son considerados en el diseño: conductividad hidráulica y licuación.

En este trabajo el procedimiento usado para la investigación sísmica abarca:

1. Definición del máximo terremoto creíble, basándose en observaciones geológicas, sismológicas e históricas;
2. Caracterización geotécnica del sitio de la represa para determinar cuales son las capas granulares más propensas a licuarse (basándose en los ensayos de campo y de laboratorio);
3. Estudio de la resistencia residual (en *estado crítico*) del suelo licuado.

¹ **Geoconsult, Inc.** – Geotechnical Engineers, Puerto Rico
P.O. Box 362040, San Juan, PR 00936-2040



Figura 1: Mapa de ubicación de la presa de Río Blanco

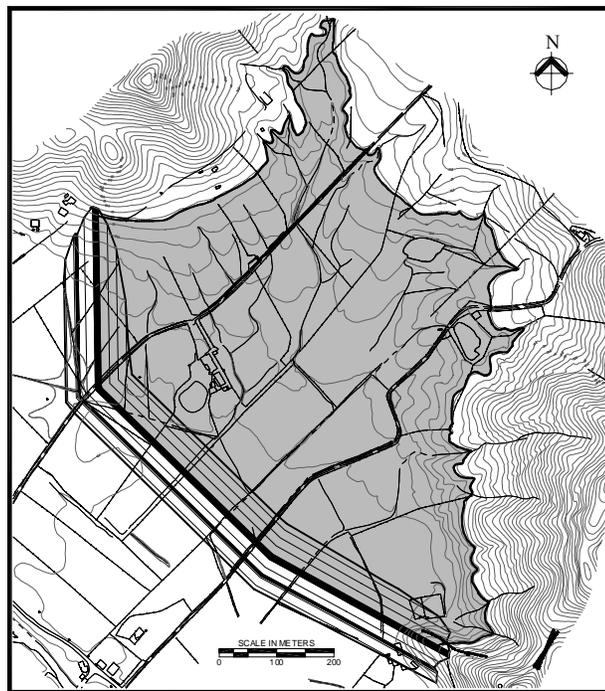


Figura 2: Dibujo esquemático de la presa y el embalse de Río Blanco

2. Caracterización Geotécnica

Las perforaciones ejecutadas muestran variaciones espaciales significativas en la litología, aún en cortas distancias. A lo largo del eje de la presa se observa que la roca base yace a una profundidad que varía entre 35 y 40 hacia el estribo izquierdo, y 115-120 pies hacia el estribo derecho.

En general, en toda el área se encuentra una gruesa capa superficial de material arcilloso de origen aluvial, con compacidad media a blanda, seguida por suelos más duros o más densos (arcillas y arenas limosas). En la base de estos depósitos aparece un estrato de roca meteorizada la cual yace sobre la roca base a unos 115 pies de profundidad (ver **Figura 3**).

El espesor de estos depósitos aluviales aumenta hacia el sur, lejos de la presa, pero disminuye rápidamente en dirección norte, hacia el embalse propuesto y los estribos de la presa. Esto sugiere que no deben esperarse amplificaciones significativas (más allá de lo estipulado en los códigos sísmicos). Esta hipótesis considera las distancias entre las zonas sísmicas fuentes y el sitio de la presa, y el hecho que los eventos sísmicos esperados deberían producir movimientos con concentración de energía hacia las altas frecuencias mientras que se espera que el sitio vibre a frecuencias más bajas. Basados en este hecho puede esperarse que las aceleraciones dentro los suelos licuables, para efectos prácticos, serán iguales a las aceleraciones de la roca base; sin embargo, más cerca de la superficie, pueden ocurrir aceleraciones más altas debido a la amplificación local en la arcilla blanda superior.

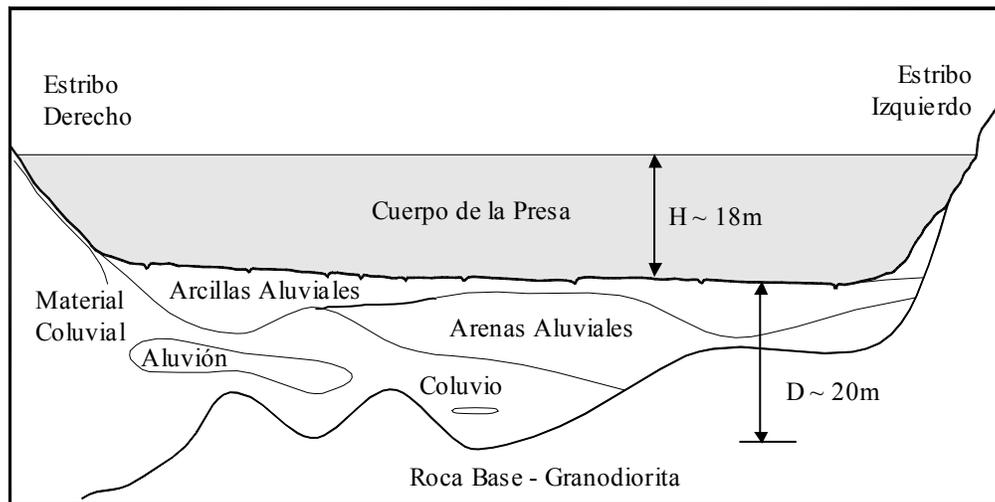


Figura 3: Estratigrafía debajo del eje de la presa

3. Caracterización Dinámica

Los parámetros dinámicos del suelo se obtuvieron de registros de perforación y de perfiles de velocidad de ondas de corte efectuados en el sitio. Como resultado de la reducción de información, el perfil definido por el análisis dinámico resultó bastante complejo, observándose una secuencia de arcillas inter-estratificadas y depósitos de arena que aumentan de rigidez con la profundidad. Esta estratigrafía se hace más intrincada en el área de los depósitos de conglomerados en forma de abanico (*Fanglomerate deposits*) cerca del estribo derecho. La base del depósito, interfase roca-suelo definida como “roca equivalente”, varía a lo largo de la alineación de la presa entre 40 y 115 pies.

4. Análisis de Licuación

La licuación de los depósitos de arena siempre va seguida por un cierto asentamiento del terreno, lo cual se produce como resultado de la disipación del exceso de presión de poros. De acuerdo con Ishihara (1990), tales asentamientos pueden alcanzar normalmente entre 10 a 20 centímetros. Los efectos de una deformación tan significativa se agravan si ocurren de manera diferencial. Más aún, si la superficie del suelo está algo inclinada la reducción de la resistencia al corte puede causar grandes deformaciones horizontales, conocidas como falla por flujo. El estudio de estos efectos es de gran importancia para las estructuras de gran longitud, tales como las presas de tierra. Por lo tanto, la evaluación del potencial de licuación, y la formulación de las correspondientes medidas de mitigación, son un factor muy importante en la evaluación del riesgo sísmico de la presa.

El análisis del potencial de licuación en este estudio sigue procedimientos basados en la determinación de la razón de esfuerzos cíclicos (CSR). Esta razón CSR depende directamente de la máxima aceleración horizontal en el sitio; lo cual motivó un análisis de microzonificación sísmica del área, a fin de obtener un mejor estimado de este parámetro. Se utilizaron 2 tipos de correlaciones diferentes con el CSR (CPT y velocidad de ondas de corte), a fin de cubrir de manera complementaria todo el área de la presa.

Como resultado de este análisis se definieron los estratos que son potencialmente licuables y se presentan mapas con isolíneas mostrando los espesores máximos esperados de estratos en los cuales puede ocurrir licuación alrededor del eje de la presa.

Adicionalmente, se discuten más a fondo los beneficios y desventajas de los métodos utilizados en este análisis y se hace mención de cuales son las nuevas tendencias de la geotecnia para atacar este problema. Aunque estas nuevas metodologías no están suficientemente validadas para ser utilizadas en la práctica convencional, representan un futuro no muy lejano para evaluar y comprender mejor el fenómeno de licuación y sus consecuencias

5. Enfoque de esfuerzo cíclico

Es un principio generalmente aceptado que el potencial de licuación de estratos arenosos puede evaluarse utilizando correlaciones entre datos de resistencia a la penetración (tales como SPT y CPT) y la resistencia cíclica del material movilizado durante una fuerte excitación vibratoria. En este estudio se utilizaron datos de ensayos CPT debido a que éstos proveen resultados más confiables de densidad relativa en

depósitos granulares. Adicionalmente, comparado con datos SPT, el cono es menos dependiente del operador del equipo y suministra un registro prácticamente continuo de la resistencia a la penetración y de la fricción lateral. Más aún, a diferencia del SPT, el efecto de perturbaciones a lo largo de la perforación no afecta la medición debido a que el cono es empujado continuamente sin requerir de la extracción y reinsertión de la probeta.

En este enfoque, la resistencia cíclica es caracterizada por la relación de esfuerzo cíclico (CSR). Básicamente, la CSR se define como el esfuerzo cortante promedio (τ_{avg}) actuante en un estrato, normalizado por el esfuerzo efectivo de sobrecarga (σ'_{vo}).

El estudio de licuación hecho para la presa de Río Blanco se basa en la correlación de esfuerzos desarrollada originalmente por Seed & Idris (1971 & 1987) y modificada por Robertson & White (1997). De acuerdo con estos autores, la CSR es una función de la duración del terremoto (representada por la magnitud del momento M_w), la aceleración horizontal máxima (representada por la aceleración pico del suelo normalizada por la aceleración de la gravedad, a_{max}/g), la profundidad del depósito granular (representada por el coeficiente de reducción del esfuerzo, r_d) y el esfuerzo vertical total normalizado (la relación entre el esfuerzo efectivo total actuando sobre el estrato, σ_{vo}/σ'_{vo}). Por lo tanto, CSR puede calcularse como:

$$CSR = \frac{\tau_{avg}}{\sigma'_{vo}} \approx 0.65 \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot r_d \quad (1)$$

Tal como lo sugirieron Schneider y Mayne (1999), r_d puede obtenerse utilizando la siguiente expresión de Idris (1999):

$$r_d = e^{[\alpha(z)+\beta(z)*M_w]} \quad (2)$$

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

$$\alpha(z) = -1.01 - 1.06 \cdot \sin \left[\left(\frac{z}{11.73} \right) + 5.133 \right] \quad (3)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \sin \left[\left(\frac{z}{11.28} \right) + 5.142 \right] \quad (4)$$

El siguiente paso es graficar los valores obtenidos de CSR contra la resistencia a la penetración del suelo. En el caso de este estudio, se utilizó la resistencia de punta del ensayo CPT, porque estos son más confiables que los datos de SPT. Una ventaja es que el CPT suministra información continua sobre el perfil el suelo, reduciendo la incertidumbre sobre las suposiciones del espesor y profundidad de los estratos licuables.

Para determinar el potencial de licuación, se comparan la posición de los puntos graficados con relación a la curva de referencia (CRR). Dicha curva CRR conecta las menores relaciones cíclicas de esfuerzos que se sabe producen licuación para un valor dado de resistencia normalizada de la punta (q_{clin}). Esta curva es considerada como una frontera para limitar las condiciones en las que la licuación puede o no ocurrir (ver **Figura 4**).

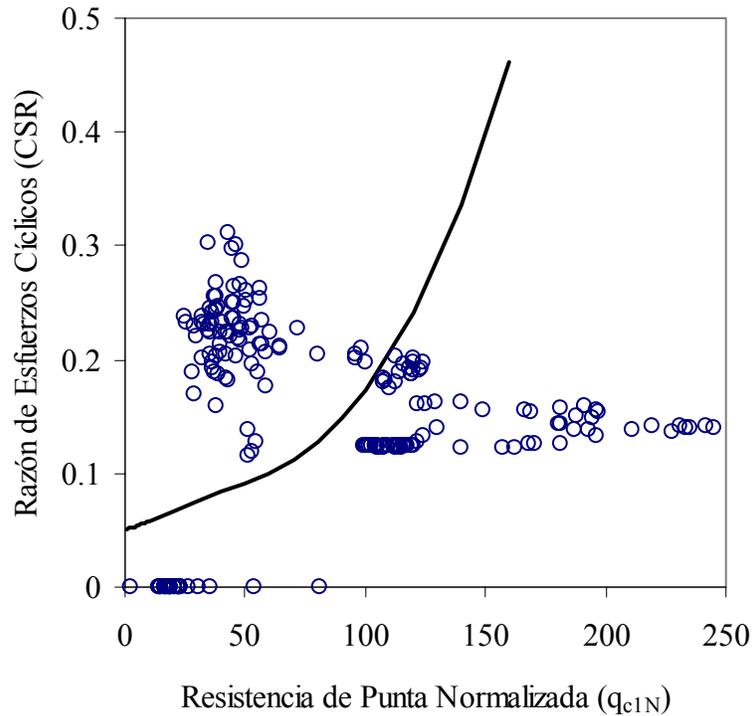


Figura 4: Evaluación del potencial de licuación en uno de los sondeos

6. Procedimiento de análisis. Análisis de licuación basada en CPT.

En este análisis se utilizaron datos de 34 ensayos CPT. Los resultados de cada ensayo se tabularon y se calcularon los esfuerzos efectivos y totales para cada profundidad. Entonces se calcularon valores CSR a todo lo largo del material granular encontrado en los perfiles (desde arena arcillosa hasta grava), entonces estos valores se graficaron contra la resistencia normalizada de la punta, q_{c1N} , siendo:

$$q_{c1N} = \frac{\left(\frac{q_c}{Pa} \right)}{\sqrt{\frac{\sigma'_{vo}}{Pa}}} = \frac{q_c}{(\sigma'_{vo} \cdot Pa)^{0.5}} \quad (Pa: \text{presión atmosférica}) \quad (5)$$

Los valores de CSR graficados son comparados con la razón de resistencia cíclica, CRR, los cuales definen el umbral donde comienza la licuación. Por lo tanto, todos los puntos sobre esta línea serán sometidos a un esfuerzo cíclico cortante mayor que su resistencia cíclica, en consecuencia se licuarán.

Las curvas de CRR dependen del tipo de la prueba de penetración utilizadas. En nuestro caso, los CRR son correlacionados con los ensayos CPT de acuerdo con la siguiente expresión presentada por Robertson & Wride (1998):

$$\text{If } 50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160 \quad \text{then: } CRR_{7.5} = 93 \cdot \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right)^3 + 0.08 \quad (6)$$

$$\text{If } (q_{c1N})_{cs} < 50 \quad \text{then: } CRR_{7.5} = 0.83 \cdot \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right) + 0.05 \quad (7)$$

Considerando la gran cantidad de datos CPT que se obtuvieron en los estudios de campo, los resultados del análisis de licuación en cada sitio se caracterizaron con dos parámetros: (a) el factor de seguridad contra licuación; y (b) el espesor del estrato licuable en cada perfil del suelo.

El factor de seguridad contra licuación, FS_L , se calculó para cada estrato licuable a fin de cuantificar el potencial de licuación. Este factor de seguridad se define como:

$$FS_L = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \quad (8)$$

Como resultado, valores de FS_L menores que uno (1) identifican estratos licuables (ver **Figura 5**). Es importante comentar que CSR es altamente dependiente de a_{max} . Por lo tanto, para reducir la incertidumbre, este parámetro debe determinarse basándose en aceleraciones pico del suelo "apropiadamente estimadas". Para este estudio, a_{max} se obtuvo a partir de análisis dinámico unidimensional de un perfil representativo del suelo.

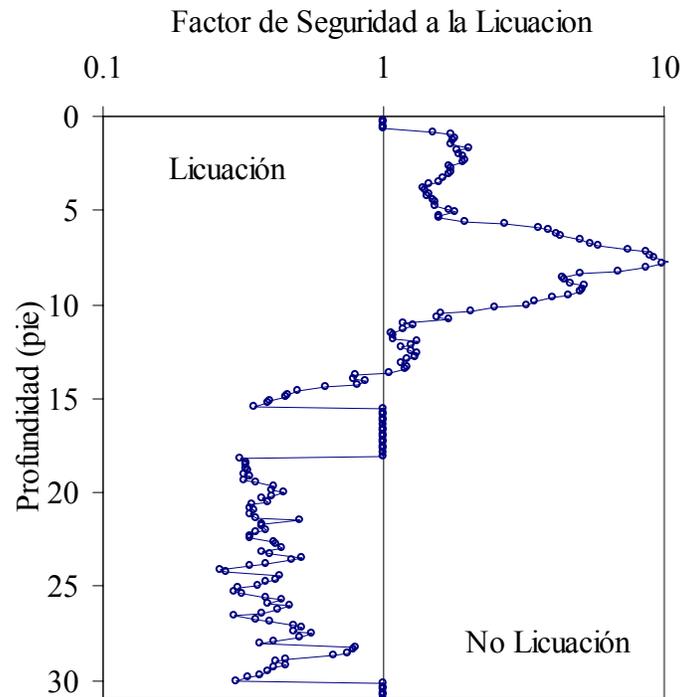


Figura 5: Definición de los espesores de los substratos licuables

Una vez calculado el FS_L a todo lo largo del perfil de suelos (considerando solamente los estratos granulares) definimos al "espesor licuable", H_L , como la suma de todos los substratos dentro de cada perfil de suelo con FS_L menor que uno (1). Entonces los valores calculados de H_L fueron graficados en los correspondientes lugares de ensayos CPT, y se produjeron isocurvas para interpolar los resultados entre los puntos de ensayo. Este procedimiento se repitió para dos valores diferentes de aceleración (ver **Figuras 6 y 7**); estas aceleraciones fueron (a) 0,19g, definida en el análisis dinámico realizado para el área de la presa, y (b) 0,40g tomada del "USGS/BSCC Project 98". A partir de estos resultados, es evidente que ocurrirá licuación en un amplio sector de la base de la presa para cualquiera de los dos valores de aceleración.

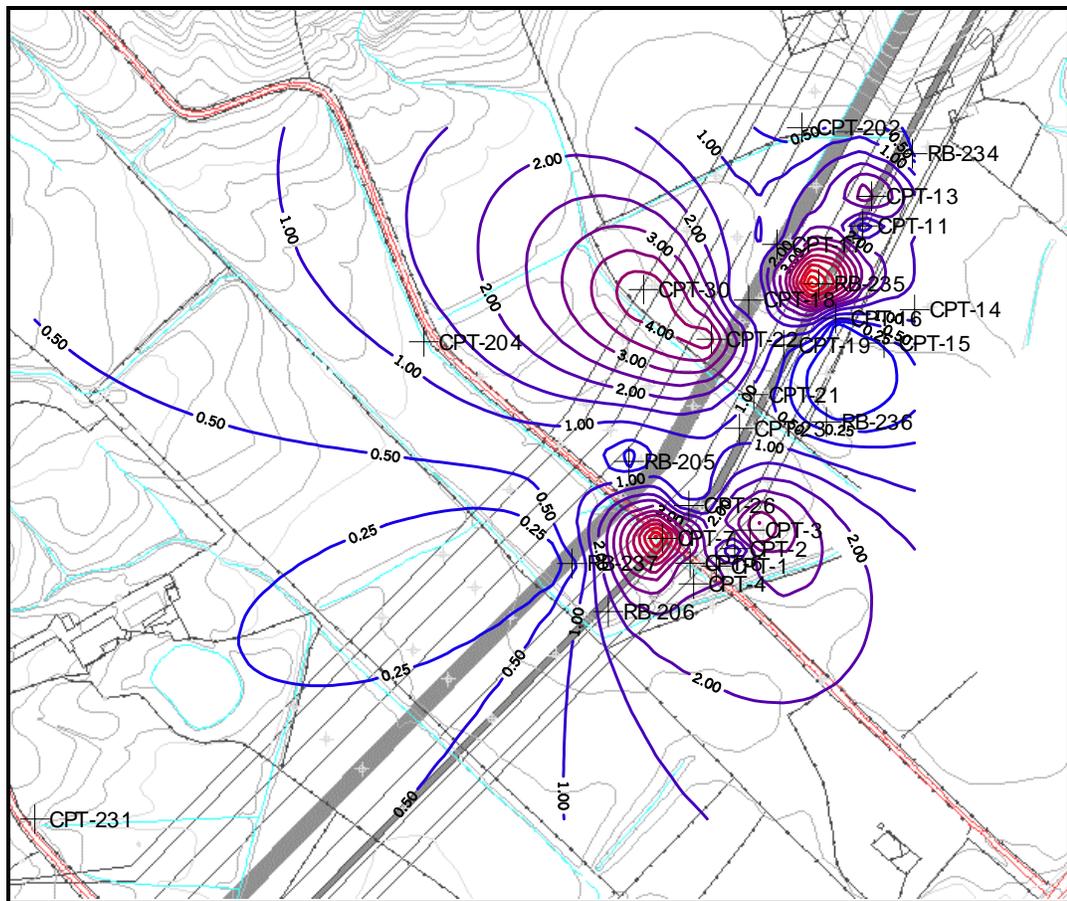


Figura 6: Isolíneas de espesores de estratos licuables (en pies) para una aceleración horizontal de 0.19 g (Análisis basado en CPT)

Para este estudio, se utilizó la correlación entre CRR y la velocidad de onda de corte de sobrecarga normalizada, V_{sl} , propuesta por Andrus y Stokoe (1997):

$$CRR_{7.5} = 0.022 \cdot \left(\frac{V_{sl}}{100} \right)^2 + 2.8 \cdot \left(\frac{1}{V_{sl}^* - V_{sl}} - \frac{1}{V_{sl}^*} \right) \quad (9)$$

Donde:

$$V_{sl} = \frac{V_s}{(\sigma'_{vo})^{0.25}} \quad (10)$$

Para contenido de finos, $FC \leq 5\%$

$$V_{sl}^* = 215 \text{ m/s} \quad (11)$$

Para contenido de finos, $5\% < FC < 35\%$

$$V_{sl}^* = [215 - 0.5(FC-5)] \text{ m/s} \quad (12)$$

Aunque este enfoque parece ser más robusto que el enfoque basado en CPT, en este estudio se utiliza solamente como una herramienta de apoyo. Las razones para esto son: (1) no hay suficientes datos disponibles para cubrir con confianza el área del estudio, y (2) no hay suficientes casos documentados para verificar la curva CRR. Sin embargo, los resultados obtenidos son consistentes con los resultados que se presentan en el análisis basado en la resistencia de punta del CPT. (ver **Figura 8**).

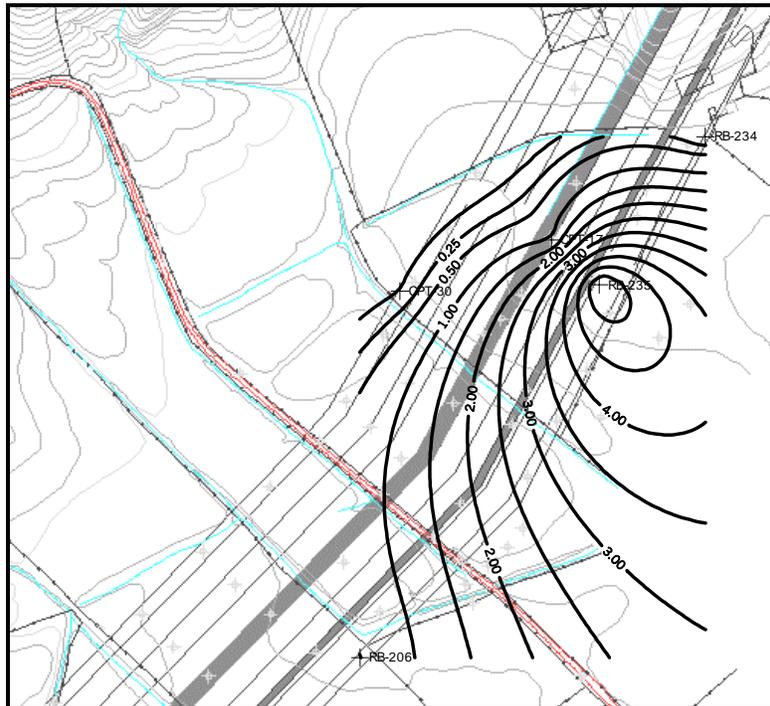


Figura 8: Isolíneas de espesores de estratos licuables (en pies) para una aceleración horizontal de 0.40 g (Análisis basado en V_s)

8. Enfoque de Mecánica de Estados Críticos

La mecánica de estados críticos está basada en la dependencia única entre cambios volumétricos, grado de confinamiento y la densidad inicial del suelo. La relación entre la deformación volumétrica de un material granular y el esfuerzo aplicado es un aspecto muy significativo de su comportamiento esfuerzo-dependiente.

En un ensayo de compresión triaxial, la tendencia de un material arenoso a contraerse o expandirse puede caracterizarse en un espacio e - σ definido por la relación de vacío y los esfuerzos efectivos de confinamiento. En este espacio, la región donde los especímenes presentan altas relación de vacío y esfuerzos efectivos de confinamiento, tiene un comportamiento contractivo. Inversamente, la región con bajas relación de vacío y esfuerzos efectivos de confinamiento define un área de comportamiento expansivo. El límite entre esas áreas contractivas / expansivas se define como la línea de estados críticos (Santamarina et al. 2000).

Se condujo un procedimiento experimental para determinar la línea del estado crítico, LEC, para un espécimen de arena tomado de una calicata bajo el eje de la presa. Los resultados de las pruebas muestran los siguientes parámetros (ver **Figura 9**): Intercepto: $\Gamma=0.911$ y pendiente: $\lambda = 0.092$.

De acuerdo con estos resultados la línea del estado crítico, LEC, puede trazarse en el espacio e - σ . Entonces las condiciones típicas del suelo antes y después de colocar la represa muestran que, aunque las condiciones iniciales tienden a mostrarse expansivas, una vez construido el terraplén, el cambio en la presión de confinamiento produce desplazamientos en el estado del suelo hacia lo contractivo.

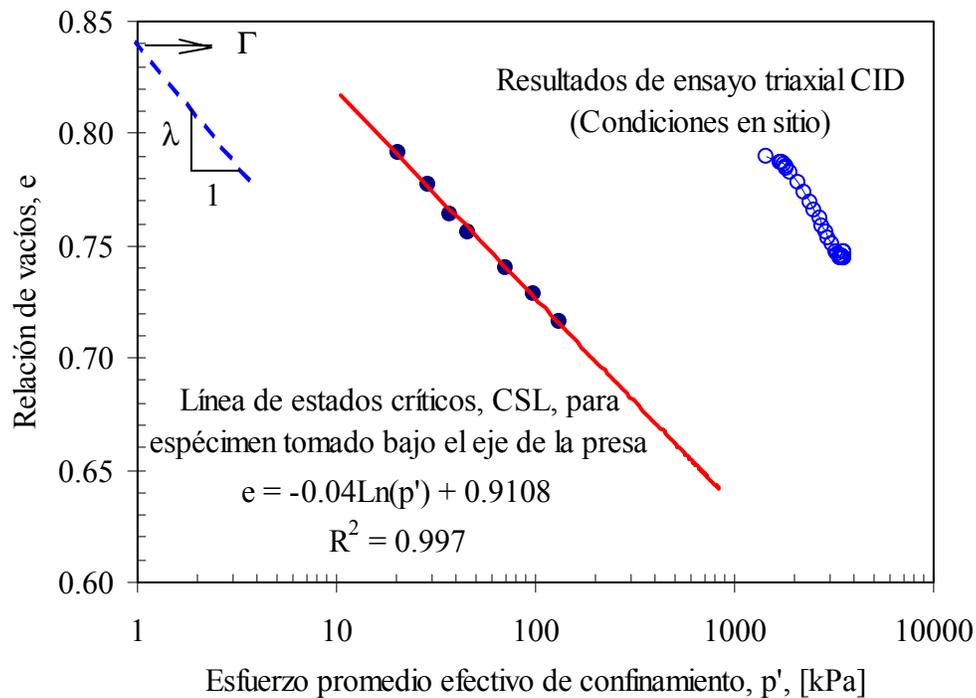


Figura 8: Enfoque de estados críticos para determinar potencial de licuación

9. Conclusiones

El criterio para la evaluación del potencial de licuación basado en los ensayos de CPT, muestra grandes áreas potencialmente licuables, lo cual tiene un gran impacto en la extensión de las necesarias medidas de mitigación para manejar el material arenoso potencialmente licuable.

De acuerdo con la evaluación basada en CPT, hay dos grandes áreas de preocupación en relación con el espesor de la capa de arena que pudiera sufrir licuación. Esas áreas están se muestran claramente en las Figuras 6 y 7, donde el espesor de las capas licuables alcanza de 4 a 7 pies.

Las correlaciones V_s son un método robusto para evaluar el potencial de licuación; sin embargo, para este estudio los datos V_s eran muy escasos. Por lo tanto. Este tipo de análisis se hizo solamente para corroborar los resultados obtenidos con las correlaciones basada en CPT.

Aunque el enfoque basado en el estado crítico sugiere que el potencial de licuación pudiera tal vez no ser tan extensivo como se muestra en el enfoque basado en las correlaciones CPT, no hay todavía suficientes datos para apoyar esta suposición. Considerando el costo y la extensión de las probables medidas de mitigación, ciertamente valdrá la pena obtener mas mediciones a los fines de validar esta hipótesis.

10. Referencias

Building Seismic Safety Council (1998) "NEHRP Recommended Provisions for New Buildings" Part 2, Commentary, FEMA

Dobry, R., Ladd, R.S., Yokel, F.Y., Chung, R.M. and Powell, D. (1982) "Prediction of Pore Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands During Earthquakes by the Cyclic Strain Method" National Bureau of Standards Publication NBS-138. July 1982

Finn, W.D.L. and Ledbetter, R.H. (1991) "Evaluation of Liquefaction Effects and remediation Strategies by Deformation Analysis" Proceedings of GEO-COAST '91. Yokohama, Japan, pp. 441-446

Ishihara, K (1990) "Evaluation of Liquefaction Potential and Consequent Deformations in Sand Fills" Proceedings of the Workshop on Seismic Issues. Port of Los Angeles, CA.

Robertson, P.K. and Wride, C.E. (1998) "Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test" Canadian Geotechnical Journal, 35 (3), pp.442-459

Santamarina, J.C., Fam, M. and Klein, K (2000) "Particulate Materials: Characterization with Elastic and Electromagnetic Waves" John Wiley & Sons.

Schneider, J.A. and Mayne, P.W. (1999) "Soil Liquefaction Response in Mid-America Evaluated by Seismic Piezocone Tests" Mid-America Earthquake Center Report MAE-GT-3A. Georgia Institute of Technology, GA

Vucetic, M. and Dobry, R. (1991) "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response" ASCE Journal of Geotechnical Engineering. 117 (1). Pp. 89-1