

CAPITULO H.5 SUELOS LICUABLES Y OTROS EFECTOS SISMICOS

H.5.0 - NOMENCLATURA

A	=	amplificación teórica de un depósito de suelo
a_{max}	=	aceleración máxima del terreno
D_m	=	duración del movimiento fuerte
E	=	módulo de elasticidad
G	=	módulo de cortante
G_{max}	=	módulo de cortante máximo
G_0	=	módulo de cortante para muy bajas deformaciones
g	=	aceleración de la gravedad
H	=	espesor del depósito de suelos
h_i	=	espesor de la capa i.
I	=	relación de impedancias
L	=	onda L, de Love
M	=	magnitud del sismo
N	=	número de ciclos de movimiento significativo, $0.65\tau_{max}$.
N_{60}	=	penetración estándar a una energía del 60%.
N_{eq}	=	número de ciclos equivalentes, mayores que un cierto porcentaje de esfuerzos
n	=	modo de vibración
P	=	onda P, o primaria
R	=	onda R, o de Rayleigh
R_{max}	=	distancia epicentral máxima a la que ocurre la licuación
REC	=	relación de esfuerzos cíclicos
r_d	=	factor de reducción de esfuerzos ≤ 1.0 .
S	=	onda S, secundaria o de cortante
T	=	período de vibración fundamental del suelo
T_n	=	período de vibración predominante del depósito
v_p	=	velocidad de la onda P o primaria
v_r	=	velocidad de la onda de cortante en la roca de base
v_s	=	velocidad de la onda de cortante
β_s	=	coeficiente de amortiguamiento del suelo
γ	=	peso unitario del suelo
λ	=	constante de Lamé
λ_s	=	longitud de la onda de cortante
μ	=	módulo de Poisson
ρ	=	densidad de masa del suelo = γ/g .
ρ_r	=	densidad de masa en la roca o en el estrato de base
ρ_s	=	densidad de masa en el suelo suprayacente
σ_v	=	esfuerzo vertical total
σ'_{v0}	=	esfuerzo vertical efectivo
τ_{cic}	=	esfuerzo cortante cíclico
τ_{max}	=	esfuerzo cortante máximo

H.5.1 - GENERALIDADES

Cuatro fenómenos son dominantes en el comportamiento de los suelos ante excitaciones sísmicas. Estos son: la amplificación, otros fenómenos asociados con la respuesta sísmica, la falla del suelo, y la licuación.

H.5.1.1 – LA AMPLIFICACION – Se define la amplificación de los movimientos sísmicos incidentes, como el aumento de las amplitudes de dicho movimiento por depósitos de suelos - ya sean arcillosos blandos o granulares de origen aluvial -;

para efectos de este Reglamento se denominan como efectos locales (Véase a este respecto las secciones A.2.4 y A.2.9 y el Apéndice H-A)

H.5.1.2 – OTROS FENOMENOS ASOCIADOS CON LA RESPUESTA SISMICA - Se define como el conjunto de reacciones particulares al movimiento sísmico y está asociado a los efectos sentidos en los cambios topográficos, en los accidentes geográficos, en las masas de agua, en excitaciones diferentes en los apoyos de estructuras largas, entre otros, muchos de los cuales pueden producir daños a las edificaciones, estructuras y líneas vitales

H.5.1.3 - LA FALLA SISMICA DEL SUELO - Bajo sollicitaciones sísmicas, el deterioro y degradación progresiva del depósito de suelos hasta que sobreviene la falla por esfuerzo cortante; se incluyen los movimientos de masas originados en la acción sísmica, tales como grandes deslizamientos.

H.5.1.4 - LA LICUACION - se define como el aumento progresivo de la presión del agua intersticial, dentro de los suelos granulares, bajo la acción sísmica, de manera que el esfuerzo efectivo se reduce eventualmente a cero y el depósito se comporta como un líquido. Son fenómenos relacionados la movilidad cíclica y el corrimiento lateral; ocurre en suelos arenosos y en limos no plásticos, saturados y parcialmente saturados

H.5.2 - CARACTERISTICAS DE LA AMPLIFICACION

H.5.2.1 - LA PARTICIPACION DEL SUELO - Puede afirmarse con certeza que si bien el depósito de suelos no está en condiciones de crear un movimiento diferente del de las ondas incidentes, logra - en cambio - transformarlas y destacar aspectos de su contenido frecuencial, de tal manera que sus consecuencias en superficie, para las construcciones, se deben más al movimiento final del suelo que al sismo originario sentido en la roca de base

H.5.2.2 - LA TRIPLE RESONANCIA - Se registra un fenómeno de triple resonancia. En primer término, efecto roca-suelo debido a similitudes entre los movimientos incidentes de sismos lejanos y los movimientos predominantes de profundos depósitos de suelos. En segundo término, efecto suelo-suelo ocasionado por el confinamiento de las ondas en la artesa, causado a su vez por la diferencia entre la impedancia del suelo contenido y la roca de base; el resultado inmediato es una mayor duración del sismo sentido en el depósito de suelos, en relación con el movimiento originario en roca. En tercer término un efecto suelo-estructura cuando coinciden sus períodos predominantes de vibración y el período fundamental de la estructura.

H.5.2.3 - AMPLIFICACION DEL DEPOSITO DE SUELO - Puede evaluarse por medio de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{1}{1 + (\pi/2)\beta_s I} \quad (\text{H.5-1})$$

H.5.2.3.1 - Relación con el Movimiento Incidente - Hay amplificación de hecho, para aceleraciones originarias en roca inferiores a 0.4 g. Para aceleraciones superiores a la antedicha se presenta el fenómeno contrario, ó sea una deamplificación

H.5.2.3.2 - Análisis - El análisis detallado del fenómeno debe hacerse obligatoriamente para las edificaciones clasificadas como grupos de uso III-IV (Artículo A.2.5 del Reglamento), para las demás categorías es opcional. Los métodos para efectuar este análisis deben estar adecuadamente sustentados dentro de la mecánica de suelos y la ingeniería sísmica. Se permite el uso de modelos unidimensionales, y cuando la información sobre los depósitos de suelos lo permitan, se pueden emplear modelos más sofisticados. Su uso debe reemplazar progresivamente los métodos aproximados; se recomienda cuando la información disponible lo justifique y sea compatible con la complejidad del proyecto. Al respecto deben consultarse los requisitos del Capítulo A.2 del Reglamento

H.5.3 – OTROS FENOMENOS ASOCIADOS CON LA RESPUESTA SISMICA

H.5.3.1 - LAS ONDAS SISMICAS - Se ha demostrado que un medio elástico infinito está en condiciones de sostener dos clases de ondas: la onda de compresión o primaria (P) y la onda de cortante o secundaria (S). Estas son las ondas de

cuerpo. También se presentan, cerca de la frontera del medio-espacio, ondas de superficie, así: la onda de Rayleigh (R) y la onda de Love (L).

H.5.3.1.1 - Velocidad de la onda P - Puede calcularse la velocidad de la onda Como:

$$v_p = \left(\frac{\lambda + 2G}{\rho} \right)^{1/2} \quad (\text{H.5-2})$$

donde las constantes de Lamé son:

$$\lambda = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (\text{H.5-3})$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (\text{H.5-4})$$

H.5.3.1.2 - Velocidad de la onda S - La velocidad de la onda S puede calcularse de la siguiente manera:

$$v_s = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{1/2} \quad (\text{H.5-5})$$

H.5.3.1.3 - Relación de velocidades - La relación entre las velocidades de las ondas de cuerpo se expresa así:

$$\frac{v_p}{v_s} = \left(2 \frac{1 - \mu}{1 - 2\mu} \right)^{1/2} \quad (\text{H.5-6})$$

H.5.3.1.4 - Longitud de la onda - La longitud de onda tiene importancia para dar escala al movimiento sísmico dentro del tamaño de la estructura que se estudia. Las longitudes de onda pueden obtenerse, así:

$$\lambda_s = v_s T \quad (\text{H.5-7})$$

H.5.3.2 - PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACION - El período fundamental, o más apropiadamente, el período predominante de vibración, y sus armónicos, de un depósito de suelo pueden estimarse así:

$$T_n = \frac{4H}{(2n - 1)v_s} \quad (\text{H.5-8})$$

Para medios estratificados, se puede emplear el siguiente promedio ponderado:

$$T_n = 4 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{(v_s)_i} \quad (\text{H.5-9})$$

H.5.3.2.1 - Métodos Sofisticados - Métodos más complejos como el análisis unidimensional de la respuesta sísmica, o el mismo tipo en dos y en tres direcciones se encuentran disponibles; se recomienda su uso cuando la complejidad del problema lo justifique.

H.5.3.3 - LA RELACION DE IMPEDANCIAS - Se define la relación de impedancias entre dos capas de un depósito de suelos o rocas, como:

$$I = \left(\frac{\rho_r}{\rho_s} \right) \left(\frac{v_r}{v_s} \right) \quad (\text{H.5-10})$$

Esta relación de impedancias tiene influencia no solo en la amplificación potencial de un depósito de suelos sino en la posibilidad de transmisión de las ondas de una capa a la otra.

H.5.3.4 - LA RESPUESTA EN SUPERFICIE - El espectro de respuesta propio del sismo incidente trae en sí mismo unos picos de respuesta que son su característica. El depósito de suelos tiene la propiedad de magnificar aquellos picos cuyo periodo coincide con su propio período o períodos predominantes.

H.5.4 - CONSIDERACIONES SOBRE LA FALLA DEL DEPOSITO DE SUELOS

H.5.4.1 - DEGRADACIÓN DEL SUELO - La rigidez del suelo, representado por su módulo de cortante, G , se degrada durante la acción sísmica. La medida de esta degradación es G/G_0 , o G/G_{max} , que aumenta con el aumento de la deformación de cortante cíclico, γ_c .

H.5.4.1.1 - Suelos cohesivos - En los suelos cohesivos G/G_0 depende fundamentalmente del índice de plasticidad, siendo los suelos de baja plasticidad afectados a más bajos niveles de deformación cíclica.

H.5.4.1.2 - Suelos granulares - En los suelos granulares se produce una degradación similar, cuya severidad depende de la densidad relativa del depósito de suelos

H.5.4.1.3 - Laboratorio - Cuando la complejidad del proyecto lo justifique, el comportamiento del suelo bajo cargas cíclicas debe investigarse en el laboratorio.

H.5.4.3 - ASENTAMIENTOS SISMICOS - Los asentamientos del suelo, producidos por causa de la actividad sísmica dependen de la calidad del suelo (densidad y resistencia) y de la intensidad y duración del movimiento.

- a) En suelos granulares, la deformación volumétrica depende de la densidad del suelo (N_{60}) y de la relación de esfuerzos cíclicos (REC) producidos por el sismo.
- b) En suelos cohesivos la sobre presión de poros, originada en el sismo, puede desatar un nuevo proceso de consolidación y los consiguiente asentamientos.

H.5.4.4 - DESLIZAMIENTOS - Los movimientos sísmicos pueden desencadenar la ocurrencia de deslizamientos de tierras y movimientos de masas. El ingeniero geotecnista debe evaluar si la degradación del suelo o la movilidad cíclica causada por el sismo de diseño está en condiciones de poner en peligro específico el proyecto.

H.5.5 - LA LICUACION Y LOS FENOMENOS RELACIONADOS

Los suelos granulares tienen una tendencia natural a densificarse bajo carga, ya sea ésta monotónica o cíclica. Cuando el suelo está saturado y el drenaje es lento o totalmente inexistente, esta tendencia a la densificación causa el crecimiento de la presión de poros, en exceso de su estado estático, y el decrecimiento correlativo del esfuerzo efectivo hasta que sobreviene la flotación de las partículas, lo que ha recibido el nombre genérico de licuación.

H.5.5.1 - LICUACIÓN DE FLUJO - Se define como un estado de movimiento catastrófico donde el esfuerzo cortante estático es superior a la resistencia correlativa del suelo en su condición licuada. Cuando sobreviene el movimiento sísmico, este actúa como un disparador y en adelante las grandes deformaciones generadas son el producto del estado de esfuerzos estáticos.

H.5.5.2 - MOVILIDAD CICLICA - En contraste con el anterior, el fenómeno denominado movilidad cíclica tiene lugar cuando el estado de esfuerzos estáticos es inferior a la resistencia del suelo licuado; durante el movimiento sísmico el estado de esfuerzos aumenta en forma escalonada hasta que se alcanza la resistencia del suelo y sobreviene la falla.

H.5.5.3 - CASOS ESPECIALES - Términos como licuación horizontal, corrimiento lateral y oscilación del terreno son casos especiales de movilidad cíclica observados en la práctica.

H.5.5.4 - VOLCANES DE ARENA - Es un fenómeno que frecuentemente acompaña la ocurrencia de la licuación, durante el movimiento sísmico, o inmediatamente después, el exceso de presión de poros es disipado, hacia arriba como la

dirección más fácil y en puntos localizados, o a lo largo de grietas, se producen erupciones de arena en estado líquido que conforman pequeños volcanes

H.5.6 - SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION

No todos los suelos son licuables. En consecuencia, es preciso conformar una lista de características del suelo mismo y de su circunstancia, que conducen a que la licuación sea posible. Estas son:

- (a) La edad geológica es determinante. suelos del Holoceno son más susceptibles que los del Pleistoceno y la licuación de depósitos de edades anteriores es rara.
- (b) El depósito de suelo debe estar saturado, o poco menos, para que ocurra la licuación.
- (c) Depósitos fluviales, coluviales, eólicos, cuando saturados, son susceptibles de licuación
- (d) Asimismo pueden clasificarse como licuables los depósitos de abanicos aluviales, planicies aluviales, playas, terrazas y estuarios.
- (e) Limos no-plásticos también ofrecen cierta susceptibilidad a la licuación.
- (f) Son más susceptibles las arenas finas, relativamente uniformes.
- (g) Son menos susceptibles los depósitos bien gradados con tamaños hasta de gravas
- (h) El contenido de finos y su plasticidad son considerados inhibitorios de la licuación.
- (i) Suelos con partículas redondeadas, son más susceptibles que suelos con partículas angulares. Suelos con partículas micáceas, propios de suelos volcánicos, son más susceptibles.
- (j) Ingrediente fundamental para que se produzca la licuación es que el depósito sea granular y que se encuentre en estado suelto

H.5.7 - NUMERO DE CICLOS

El número de ciclos significativos del movimiento sísmico es definido como aquel que causa un esfuerzo cortante superior a $0.65 \tau_{max}$. Este número puede calcularse así:

$$N_{0.65\tau_{max}} = \pi \sqrt{D_m} \tag{H.5-11}$$

La tabla H.5-1 presenta el número de ciclos en su relación con la magnitud del movimiento sísmico.

Tabla H.5-1

Magnitud	No. de Ciclos de Esfuerzo significativos (N_{eq})
5¼	2-3
6	5
6¾	10
7½	15
8½	26

H.5.8 - ESFUERZO CORTANTE CICLICO

El esfuerzo cortante cíclico producido por un número equivalente de ciclos puede evaluarse como se indica a continuación.

$$\tau_{c,c} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \sigma_v r_d \tag{H.5-12}$$

donde.

$$\sigma_v = \gamma h \tag{H.5-13}$$

H.5.9 - RELACION DE ESFUERZOS CICLICOS

Las curvas de esfuerzos cíclicos son frecuentemente normalizadas dividiendo el esfuerzo total por el esfuerzo efectivo inicial de sobrecarga. De esta manera se obtiene la relación de esfuerzos cíclicos (REC), como:

$$REC = \frac{\tau_{cic}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_{v0}} r_d \quad (H.5-14)$$

H.5.10 - CRITERIOS DE LICUACION

Con base en la recopilación de información sobre ocurrencia de licuación en sismos anteriores se han podido dibujar las curvas que expresan los criterios de licuación como la relación de esfuerzos cíclicos producidos por el temblor en consideración y la resistencia del suelo expresada como el número de golpes del ensayo de penetración estándar para una energía del 60%, N_{60} . Las curvas se expresan en las figuras H-5-1 y H.5-2, las cuales presentan la relación de esfuerzos que producen licuación para diversas magnitudes de terremotos, y la misma relación para un contenido variable de finos en la arena potencialmente licuable, respectivamente.

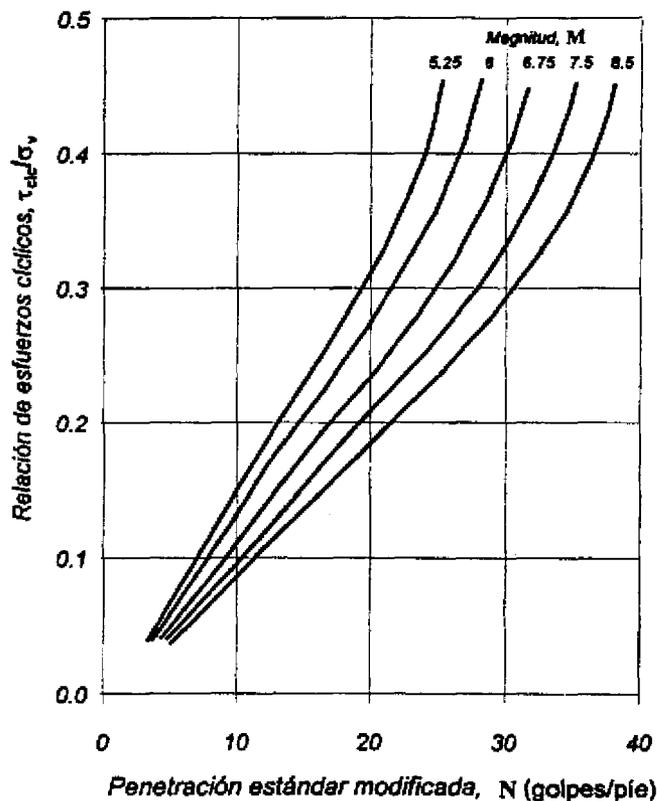


Figura H.5-1 – Variación de la relación de esfuerzos cíclicos (REC) con el ensayo de penetración estándar para diversos valores de N

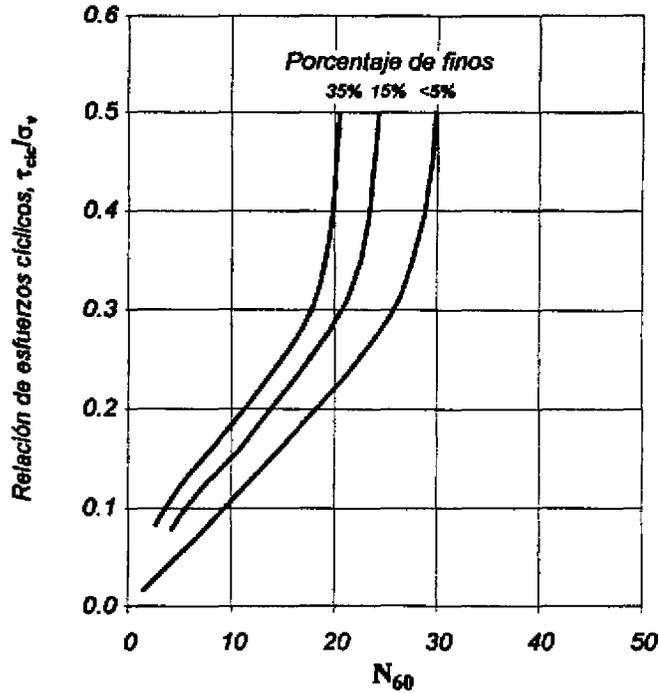


Figura H.5-2 – Variación de la relación de esfuerzos cíclicos (REC) con el ensayo de penetración estándar para contenidos de finos diversos

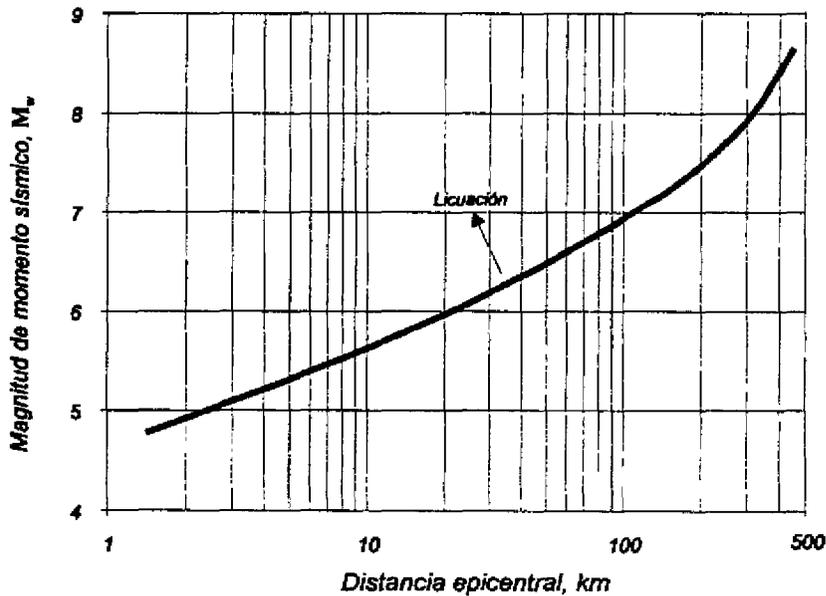


Figura H.5-3 – Relación entre la magnitud del sismo y la distancia epicentral donde se ha presentado históricamente licuación

H.5.11 - ALCANCES DE LA LICUACION

Un sismo determinado tiene la capacidad de ocasionar licuación hasta cierta distancia epicentral. Esta distancia puede estimarse así:

$$\log R_{\max} = 0.77M - 3.6$$

(H.5-15)

H.5.12 - CRITERIO GRAFICO

El mismo tipo de criterio se expresa en la figura H.5-3 donde se ha recogido un buen número de casos de licuación producido por sismos superficiales. Se sabe que sismos profundos producen licuaciones a distancias algo mayores. Par ilustrar el significado de esta información, se citan como ejemplos los siguientes casos: un sismo de magnitud 6 puede producir licuación a 20 km de distancia epicentral; uno de magnitud 7 lo hace a 100 km y uno de magnitud 8 a 300 km.

H.5.13 - METODOS PARA MEJORAR LA RESISTENCIA DE LOS DEPOSITOS DE SUELOS A LA LICUACION

En correspondencia con los factores que aumentan la vulnerabilidad del suelo ante los esfuerzos cíclicos (H.5.6) se expresan los métodos para mejorar dicha resistencia. Estos son:

- (a) *Explosiones y voladuras* - Con un patrón determinado y a una profundidad relacionada con la magnitud del problema, puede inducir licuación limitada y producir la densificación del material hasta 40 m.
- (b) *Vibro-densificación* - Es una densificación por vibración que opera por medio de una licuación moderada que produce densificación del depósito.
- (c) *Vibro-compactación* - Vibración bajo agua que produce la densificación de material; las aberturas son rellenadas luego con material compactado.
- (d) *Pilotes de compactación* - Procede mediante el hincado con vibración de pilotes de desplazamiento.
- (e) *Compactación dinámica* - Mediante una repetida aplicación del impacto de un gran peso dejado caer desde cierta altura con una guía preparada para el efecto.
- (f) *Inyecciones de compactación* - Inyecciones de una mezcla gruesa y viscosa de material que produce el desplazamiento y la compactación del depósito.
- (g) *Estribos de sobrecarga* - Que consiste en aumentar la resistencia a la licuación aumentando, con sobrecarga, la presión afectiva de confinamiento.
- (h) *Drenajes* - Drenajes y subdrenajes de grava, gravilla, drenajes tipo "Wick" y pozos para mantener baja la presión del agua y disipar eventuales excesos.
- (i) *Inyección de elementos químicos* - Inyección a presión de elementos químicos cementantes del depósito arenoso grueso.
- (j) *Jet grouting* - Que excava, mezcla y rellena materiales adicionales, incluso cementantes mediante chorros de agua a alta presión.
- (k) *Pilotes y pantallas preexcavadas* - La colocación de pilotes y pantallas -a presión o sin ella- rellenos en cemento, cal, o asfalto reducen el potencial de licuación.
- (l) *Vitrificación in-situ* - Consiste en la fundición del suelo mediante chorros de fuego que transforman el material en roca.
- (m) *Vibro-reemplazo* - Huecos perforados a golpes, son luego rellenados con grava arena y piedra, con o sin agentes cementantes.
- (n) *Pilotes Radicales* - A veces llamados banderillas, con diámetro reducido, perforados e inyectados, pueden reducir el potencial de licuación