Ensayo de colapso en cámara triaxial

Medina, José
Proyectos Laboratorios y Supervisión S. C.
Departamento de Ingeniería Civil y Minas – Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México

ABSTRACT
A procedure for the test of collapse soils in the triaxial compression test is presented. The method offers the following advantages: it takes into account the state of the confining-stress of the field`s soil; it permits the soil to deform in three directions and the test specimen to fail by shear strength; lastly, it permits a clear definition of the stress of the soil fail by shear and lateral deformation. In addition, this test offers a better approximation to reality compared with the test in which the material is confined within a metallic ring. Based on the results obtained with the triaxial compression test, a methodology is presented for realizing the stability analysis of a build foundation upon an collapse soil

PRESENTACIÓN TÉCNICA
Se expone un procedimiento para el ensayo de suelos colapsables en cámara de compresión triaxial. El método presenta las siguientes ventajas: toma en cuenta el estado de confinamiento de la masa de suelo en el campo; se permite que la probeta se deforme en tres direcciones y que ésta falle por resistencia al esfuerzo cortante; se define de manera clara el esfuerzo de falla del material por esfuerzo cortante y deformación lateral; además este ensayo ofrece una mejor aproximación a la realidad si se compara con el ensayo en el que se confina al material en un anillo metálico. Por otra parte, con base en los resultados obtenidos en el ensayo en la cámara triaxial, se expone una metodología para efectuar el análisis de estabilidad de una cimentación desplantada sobre un suelo colapsable.

1 INTRODUCCIÓN

Los suelos colapsables son característicos de las zonas áridas y están compuestos por arenas finas y limo unidos por arcillas y carbonato de calcio. Cuando estos suelos entran en contacto con el agua se rompe la estructura del material y las edificaciones colocadas sobre ellos experimentan importantes asentamientos con daños considerables. Tradicionalmente estos materiales se han estudiado en el odómetro, en donde se restringe la deformación lateral y se impide a la probeta fallar por cortante y deformación lateral (Jennings and Knight, 1975; Zeevaert, 1983). En este trabajo se expone un procedimiento para ensayar un suelo colapsable en la cámara de compresión triaxial, en donde se permite la deformación de la probeta en tres direcciones y no se impide la falla de la misma por resistencia al esfuerzo cortante.

Se realizan ensayos de colapso tanto en la cámara de compresión triaxial como en el odómetro. Las pruebas se efectúan en muestras del tipo inalterado de un suelo colapsable de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México. Las muestras ensayadas se tomaron lo más cercanamente posible unas de otras.

2 ENSAYOS DE COLAPSO

El suelo ensayado presentó las siguientes características: humedad natural de 6.6 %; masa volumétrica natural de 1 540 kg/m^3; contenido de arena de 29.1 %; contenido de finos de 70.9 %; límite líquido de 33 %; límite plástico de 24 % y gravedad específica de sólidos de 2.72; relación de vacíos de 0.92. El suelo se clasifica de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos como limo de baja compresibilidad (ML). Los ensayos anteriores se realizaron de acuerdo con las normas ASTM (2007).

2.1 Ensayo en cámara triaxial

Este ensayo se realiza en la cámara de compresión triaxial, en ensayos del tipo consolidado drenado con esfuerzos controlados.

A continuación se describe el procedimiento utilizado para el ensayo del suelo colapsable en la cámara triaxial, (Figura 1):

2.1.1 Primera etapa del ensayo:

a) La probeta con su contenido de humedad natural se monta en la cámara de compresión triaxial.
b) Se aplica el esfuerzo de confinamiento similar al esfuerzo horizontal al que estaba sometido el material en campo, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = k_o \, \sigma_{oz} \qquad [1]$$

k_o es el coeficiente de presión lateral de tierras en reposo.

c) Seguidamente se aplica un incremento de carga en el eje vertical, para llevar a la muestra a un esfuerzo vertical similar al de campo:

$$\Delta\sigma_v = \sigma_{oz} - \sigma_{oh} \quad [2]$$

$$\Delta\sigma_v = (1 - k_o)\ \sigma_{oz} \quad [3]$$

σ_{oz} y σ_{oh}, son los esfuerzos a los que está sometido el material en campo, vertical y horizontal, respectivamente.

Nótese que al final de la primera etapa del ensayo, la muestra se encuentra sometida a un estado de esfuerzos similares a los que están actuando sobre el material en campo.

2.1.2 Segunda etapa del ensayo:

d) En la segunda etapa del ensayo se aplica un incremento en el esfuerzo axial, $\Delta\sigma_z$, y al término de la deformación se ajusta a cero el dispositivo de medición de la deformación vertical.
e) Por el conducto de desagüe inferior se aplica agua hasta que el líquido toque la cara inferior de la probeta, permitiendo al líquido ascender por capilaridad hasta lograr la saturación. Después se inunda la muestra por los conductos de desagüe.
f) Se deja transcurrir el tiempo necesario para que la probeta termine de deformarse por la saturación del material y se registra la deformación de la probeta por saturación.
g) El ensayo se repite con tres o cuatro probetas más del mismo material, para diferentes incrementos en el esfuerzo, $\Delta\sigma_z$, aplicado a la probeta en la segunda etapa del ensayo -punto d) anterior-. Es conveniente que la primera probeta se ensaye con $\Delta\sigma_z = 0$ y al término de la deformación por saturación, se lleve a la falla en incrementos de carga. Con los resultados obtenidos en este ensayo se programa el resto de las probetas.

Las muestras ensayadas fueron de 35 mm de diámetro y 70 mm de altura, permitiéndose el drenaje por ambas caras de la muestra. El esfuerzo de confinamiento, σ_c, aplicado en la primera etapa de todos los ensayos fue de 8.75 kPa, empleándose un regulador para mantener constante la presión de confinamiento, y un manómetro de mercurio, con aproximación de 1 mm, para medirla.

La primera probeta se ensayó con un esfuerzo vertical nulo y al término de la deformación de la misma se llevó a la falla para tener una estimación del esfuerzo de ruptura y, con ello, programar el resto de los ensayos. En la Figura 2 se muestra la gráfica esfuerzo-deformación unitaria obtenida en estos ensayos.

2.2 Ensayo en el odómetro

A continuación se describe el procedimiento utilizado para el ensayo del suelo colapsable en el odómetro.

a) La probeta con su contenido de humedad natural se coloca en el interior del anillo metálico.
b) se aplica un incremento de esfuerzo axial, $\Delta\sigma_z$, y al término de la deformación, se ajusta a cero el dispositivo de medición de la deformación vertical.
c) Se agrega agua hasta que el líquido toque la cara inferior de la probeta, permitiendo al agua ascender por capilaridad hasta lograr la saturación del material. De ser necesario se agrega agua para mantener el nivel en la cara inferior de la probeta. Después de 24 horas se inunda la muestra de suelo.
d) Se deja transcurrir el tiempo necesario para que la probeta termine de deformarse por la saturación del material.
e) Se calcula la deformación unitaria del material, debida a la saturación del mismo.

Las dimensiones de las muestras ensayadas fueron de 80 mm de diámetro y 20 mm de espesor, permitiéndose el drenaje por ambas caras de la muestra. La deformación axial de las probetas se midió con micrómetros con rango de 25.4 mm y aproximación de 0.01 mm.

Es costumbre, en el ensayo del odómetro cargar al material a niveles de esfuerzo muy alto, por tal motivo se cargó al material cerca de 600 kPa.

En la Figura 2 se muestra la gráfica esfuerzo-deformación unitaria obtenida en estos ensayos; mientras que en la Figura 3 se muestra un detalle de la Figura 2 para un nivel bajo de esfuerzos.

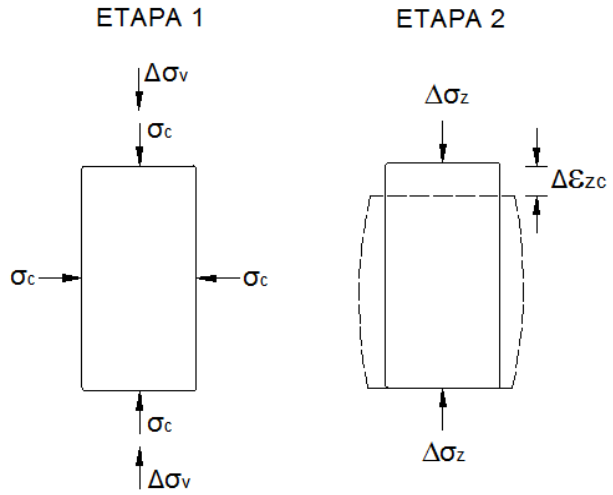

Figura 1. Ensayo de colapso en cámara triaxial

3 MÓDULO DE DEFORMACIÓN POR COLAPSO

El módulo de deformación por colapso es la relación de la deformación unitaria vertical -debida a la deformación del material por saturación- entre el incremento en el esfuerzo vertical aplicado al suelo y es necesario para

efectuar el análisis de interacción suelo-estructura con el fin de determinar los esfuerzos de contacto y los desplazamientos verticales en una cimentación apoyada en un suelo colapsable (Medina 2005).

Para la determinación de los módulos de deformación por colapso es necesario conocer los esfuerzos verticales, tanto iniciales como finales, a que se somete al subsuelo de cimentación, ya que dicho módulo es función de este nivel de esfuerzos (Figura 4).

$$\sigma_z = \sigma_{oz} + \Delta\sigma_z \qquad [4]$$

σ_{oz} es el esfuerzo vertical inicial; σ_z es el esfuerzo vertical final y $\Delta\sigma_z$ es el incremento en el esfuerzo vertical, provocado por la aplicación de la sobrecarga.

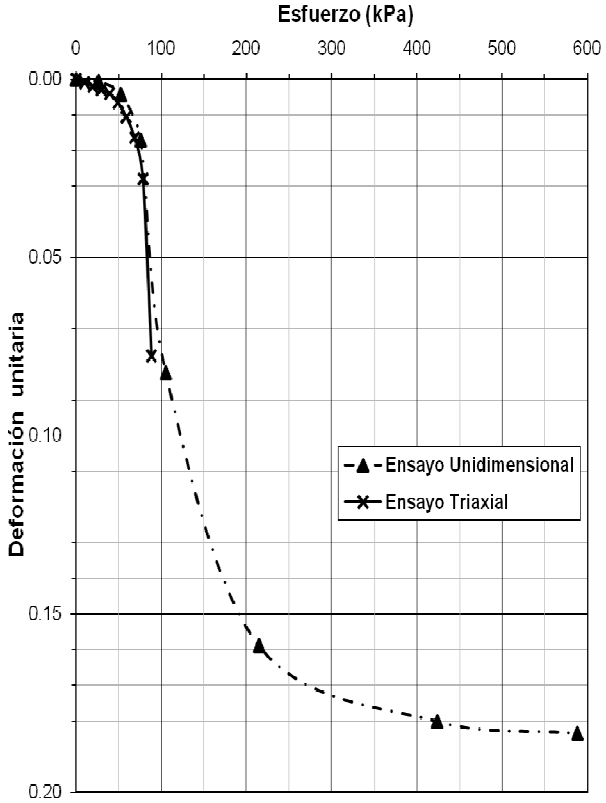

Figura 2. Gráficas esfuerzo-deformación unitaria obtenida en los ensayos de colapso

El módulo de deformación por colapso, Mzc, se determina con la siguiente expresión:

$$Mzc = \Delta\varepsilon_{zc} / \Delta\sigma_z \qquad [5]$$

$\Delta\varepsilon_{zc}$ es la deformación unitaria vertical producida por la saturación del material, cuando actúa sobre el suelo el esfuerzo $\Delta\sigma_z$.

El módulo Mzc se utiliza para representar la característica de colapso del material al incrementar su contenido de agua, y debe medirse al mismo nivel de esfuerzo a que estará sometido el suelo colapsable en campo.

En Tabla 1 se muestra el cálculo del módulo de deformación por colapso obtenido en el ensayo triaxial.

En la Figura 5 se muestra la gráfica $\Delta\sigma_z$ – Mzc correspondiente al ensayo triaxial.

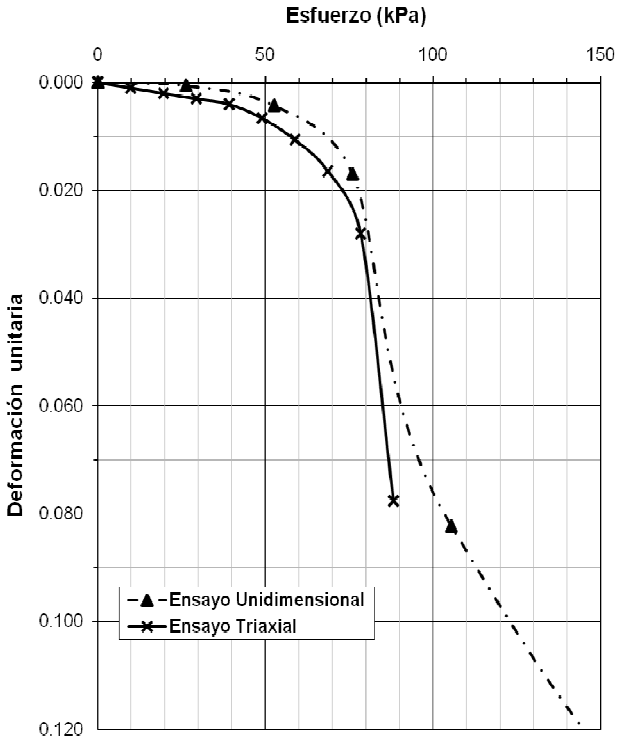

Figura 3. Detalle de la gráfica esfuerzo deformación unitaria (Figura 2) obtenida en los ensayos de colapso

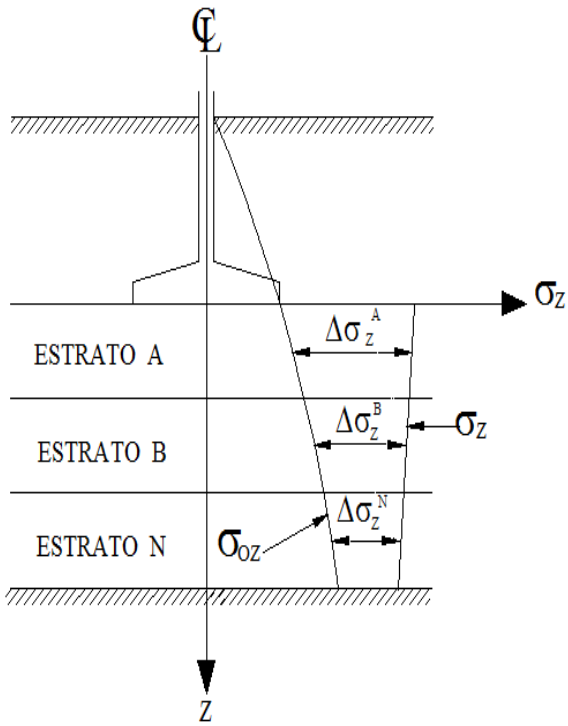

Figura 4. Distribución de esfuerzos en el subsuelo de cimentación.

Tabla 1. Módulo de deformación por colapso correspondiente a los ensayos en cámara triaxial.

$\Delta\sigma_z$ (kPa)	$\Delta\varepsilon_{zc}$	Mzc (m^2/kN)
9.8067	0.0010	1.0197E-04
19.6133	0.0020	1.0197E-04
29.4200	0.0030	1.0197E-04
39.2266	0.0040	1.0197E-04
49.0333	0.0066	1.3460E-04
58.8399	0.0106	1.8015E-04
68.6466	0.0164	2.3890E-04
78.4532	0.0280	3.5690E-04
88.2599	0.0776	8.7922E-04

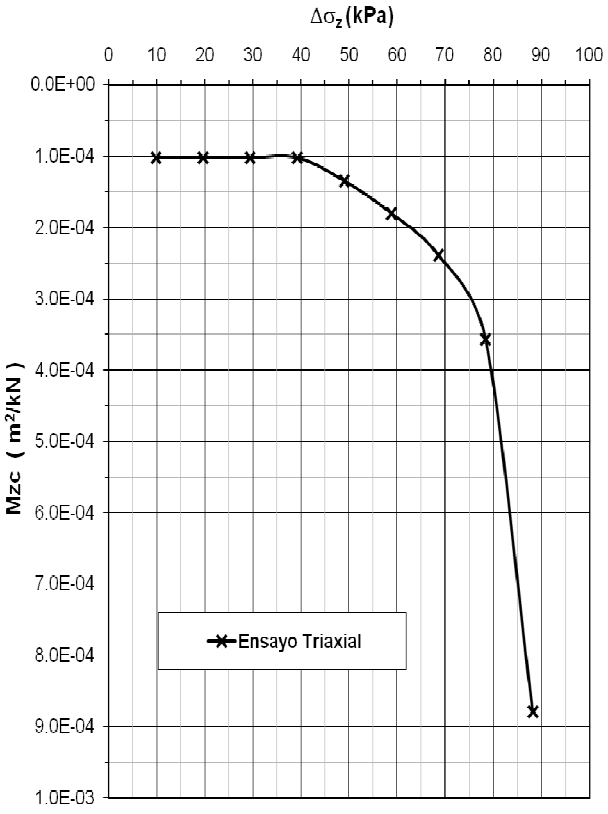

Figura 5. Gráfica $\Delta\sigma_z$ – Mzc correspondiente al ensayo triaxial

4 ESTABILIDAD DE UNA CIMENTACIÓN DESPLANTADA SOBRE UN SUELO COLAPSABLE

4.1 Esfuerzo de falla por colapso

El esfuerzo de falla por colapso, σ_{CO}, se define como el valor del esfuerzo axial mínimo necesario para que la probeta -en la segunda etapa del ensayo- falle después de la saturación del material. Para el suelo colapsable de la ciudad de Hermosillo, Sonora, aquí estudiado, el esfuerzo de falla por colapso es de 88 kPa.

4.2 Esfuerzo de colapso crítico

De la figura 4 se observa que el módulo de deformación por colapso para el caso del suelo ensayado de la ciudad de Hermosillo, Sonora, es prácticamente constante para un incremento en el esfuerzo de aproximadamente el 45% de σco, por lo que es conveniente diseñar la cimentación con el fin de que los esfuerzos que se transmitan al material colapsable no sobrepase significativamente este valor, definiéndose así el esfuerzo de colapso crítico como el valor del incremento en el esfuerzo vertical, para el cual el módulo de deformación por colapso aumenta significativamente. Para el caso particular del suelo aquí estudiado, el esfuerzo de colapso crítico es aproximadamente igual a 50 kPa.

4.3 Presión de contacto crítica

La presión de contacto crítica, qcr, se define como la presión de contacto suelo cimentación requerida para que en el centro del estrato del suelo colapsable, el incremento en el esfuerzo vertical -transmitido por la cimentación- sea igual al esfuerzo crítico, σcr, es decir:

$$qcr = \sigma cr / I_F \qquad [6]$$

Donde I_F es el valor de influencia al centro del estrato colapsable, debido a la presencia de la cimentación sobre el material colapsable. I_F puede estimarse a partir de las teorías de distribución de esfuerzos obtenidas de la teoría de la elasticidad.

Nótese que la presión de contacto crítica no es un parámetro constante del suelo, sino que es función de: tipo de cimentación, dimensiones de la cimentación, profundidad de desplante de la cimentación, del esfuerzo de confinamiento de campo del material y del esfuerzo de colapso crítico.

4.4 Presión de contacto admisible

Para asegurar que la cimentación sea estable, la presión de contacto suelo-cimentación, qa, debe ser menor o

igual a la presión de contacto admisible por colapso, qad:

$$qa \leq qad = 0.65\ \sigma co\ /\ I_F \qquad [7]$$

4.5 Estimación del desplazamiento vertical

El desplazamiento vertical producido por la saturación del suelo, puede estimarse con la siguiente ecuación:

$$\delta_z = Mzc\ \Delta\sigma_z\ H \qquad [8]$$

donde δz es el desplazamiento vertical de la cimentación por la saturación del suelo, $\Delta\sigma_z$ es el incremento en el esfuerzo vertical en el centro del espesor del material colapsable y H es el espesor del material colapsable que entra en contacto con el agua.

5 EJEMPLO

5.1 Planteamiento del problema

Considérese un depósito suelo colapsable de 2.50 m de espesor, con las características descritas en el capítulo 2 y gráficas 3 y 5. Se desea calcular, para una zapata aislada cuadrada de 1.50 m de lado y desplantada a 1.0 m de profundidad:

a) La presión de contacto crítica y presión de contacto admisible.
b) El asentamiento de la cimentación por saturación correspondiente a la presión de contacto crítica.

5.2 Solución del problema

5.2.1 Cálculo de la presión de contacto crítica y presión de contacto admisible

A partir de la ecuación propuesta por Zeevaert (1980) para cimentaciones rectangulares, con un factor de distribución de esfuerzos de Frohlich, χ = 3, bajo el centro de la cimentación y a una profundidad de 0.75 m, se tiene un valor de influencia I_F de 0.72, con lo que la presión de contacto crítica, qcr, es de 70 kPa. La presión de contacto admisible es de 80 kPa.

5.2.2 Estimación del asentamiento correspondiente a la presión de contacto crítica

De la Figura 5, con un esfuerzo de 50 kPa, se obtiene un módulo de deformación por colapso de 1.45E-04 m^2/kN, y con la Ecuación 8 se obtiene un asentamiento de 1.1 centímetro.

6 CONCLUSIONES

Se ha expuesto un ensayo de laboratorio para estudiar los suelos colapsables en la cámara de compresión triaxial y se ha comparado éste con el ensayo tradicional en el odómetro.

Las ventajas del método de ensayo de colapso en la cámara de compresión triaxial son:

a) Toma en cuenta el estado de confinamiento en el que se encuentra la masa de suelo en el campo.
b) Durante el ensayo, se permite que la probeta se deforme en tres direcciones, y que ésta falle por resistencia al esfuerzo cortante y deformación lateral.
c) Es posible estimar el esfuerzo vertical al que falla, por esfuerzo cortante y deformación lateral el material.
d) Con los resultados obtenidos en este ensayo, se puede efectuar un análisis de estabilidad de las cimentaciones desplantadas sobre suelos colapsables.
e) Se miden de manera directa las características de colapso del material.
f) El ensayo se realiza con mayor aproximación a las condiciones reales.

Por otra parte, las ventajas del método de prueba en el odómetro son:

a) El tiempo de labrado de la probeta en el anillo metálico es menor que el tiempo de labrado de la probeta correspondiente al ensayo triaxial.
b) El tiempo requerido para la saturación de la probeta en el odómetro es menor que el requerido en el ensayo triaxial.
c) Se miden de manera directa las características de colapso del material.

La deformación unitaria por la saturación del suelo colapsable, fue mayor en los ensayos efectuados en la cámara triaxial, que en los realizados en el odómetro. Lo anterior fue más notorio para esfuerzos cercanos al esfuerzo de falla por colapso.

El tiempo promedio empleado en el labrado de una de las probetas en el anillo metálico fue de 2.5 horas; mientras que el tiempo utilizado en labrar una probeta cilíndrica para ensayarse en la cámara triaxial, fue de 3.5 horas. El tiempo requerido para la saturación del material en el odómetro fue de 24 horas; mientras que en el ensayo triaxial requirió 2 días. De lo anterior se concluye que el tiempo adicional utilizado en la cámara triaxial bien se justifica, dadas las ventajas que se obtienen en este ensayo.

Con base en los resultados obtenidos en el ensayo de colapso en la cámara triaxial, se ha expuesto una metodología para estudiar la estabilidad de las cimentaciones construidas sobre suelos colapsables, la cual tiene la ventaja de su sencillez, su fácil aplicación y

el hecho de que asegura un diseño racional de la cimentación.

Cuando parte del subsuelo de cimentación colapsa por la saturación del material, en la zona en donde ocurre disminuye la presión de contacto suelo-cimentación y aumenta en las zonas contiguas al sitio en donde se presenta el colapso, por lo que se produce una redistribución del esfuerzo de contacto y un reajuste en los desplazamientos verticales. Esta redistribución de la presión de contacto y desplazamientos verticales está en función de las características de colapso de la masa de suelo, del espesor del material colapsable, de la magnitud de los esfuerzos transmitidos por la cimentación a la masa de suelo, de la rigidez de la estructura de cimentación, del tipo de cimentación, de las dimensiones de la cimentación, del tipo de cargas que actúan sobre la cimentación y de la posición de las cargas sobre ella. Medina (2005) expone un procedimiento de interacción suelo estructura para una cimentación desplantada en un suelo colapsable, en donde se toma en cuenta las variables antes mencionadas.

REFERENCIAS

ASTM, (2007). Annual Book of ASTM Standards, USA, Vol. 04.08 Soil and Rock.

Jennings, J. E. and Knight, K. 1975. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlements due to collapse of grain structure, 6 Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Johannesburg: 99-105.

Medina, J. 2005. Interacción suelo estructura de cimentación en zapatas aisladas con trabes de liga apoyadas en suelo colapsable. *Primer congreso internacional de ingeniería*, Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, Querétaro, México: 21-30.

Zeevaert, L. 1983. *Foundation engineering for difficult subsoil conditions*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, USA.

Zeevaert, L. 1980. *Interacción suelo estructura de cimentación*, Limusa, México D.F., México.