

Efecto de la tasa de carga isotrópica en ensayos triaxiales no saturados

Barahona, C.^a, Sandi, L.^b, Rojas, J.C.^c

^a Investigador laboratorio de Geotecnia. Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: Christian.Barahona@UGent.be, christianbarahona07@outlook.com

^b Estudiante de maestría en Geotecnia (USFX). E-mail: luissandiv@yahoo.com

^c Docente titular Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: geotecnia@gmail.com

RESUMEN

La presente investigación, describe los resultados de un estudio experimental sobre los efectos de la tasa de carga y velocidad de corte, en muestras de suelo parcialmente saturado, mediante la utilización de una versión de un equipo triaxial experimental. El plan de laboratorio consiste en una serie de ensayos triaxiales drenados (CD), en muestras parcialmente saturadas reconstituidas de suelo. Dicho material de ensayo, corresponde a un material granular con bajo porcentaje de finos, proveniente de la región de Sucre – Bolivia, clasificado como arena limosa (SM), de acuerdo al Sistema de Clasificación Unificado (USCS). Se utilizaron probetas remodeladas, mediante el método de apisonamiento de compactación en capas iguales.

Con el objetivo de estudiar las variaciones de volumen y de esfuerzo debido a la tasa de carga y velocidad de corte durante cada etapa de los ensayos triaxiales no saturados, se aplicaron dos tasas de carga distintas (32kPa/h y 128kPa/h) en las muestras, durante la etapa inicial de compresión isotrópica del ensayo triaxial. Posteriormente, en la etapa de corte de los ensayos, se consideraron dos velocidades de corte (0.5%/h y 2.5%/h) en condición drenada. Por otra parte, los ensayos drenados fueron realizados bajo condiciones de succión controlada constante (15kPa, 45kPa), gracias al control y medición independiente de la presión de poro agua y presión de poro de aire, permitiendo la utilización de la técnica de traslación de ejes.

Los resultados experimentales obtenidos durante la etapa de compresión isotrópica, muestran que las tasas de carga aplicadas, tienen un efecto no considerable en la variación de volumen específico de las muestras seleccionadas. Por otra parte, las velocidades de corte aplicadas en la fase de corte, presentan un leve incremento en el valor del esfuerzo de corte pico en la curva esfuerzo-deformación. Finalmente, los datos obtenidos fueron comparados con una investigación previa realizada por Rojas y Mancuso (2009), en la cual se emplearon, tanto valores similares de succión constante, como de tasas de carga y velocidades de corte.

Palabras clave: mecánica de suelos no saturados, ensayo triaxial, velocidad de carga, succión constante.

ABSTRACT

The present investigation describes the results of an experimental study on the effects of the loading rate and cutting speed, in partially saturated soil samples, using a version of an experimental triaxial equipment. The laboratory plan consists of a series of drained triaxial tests (CD), on reconstituted partially saturated soil samples. Said test material corresponds to a granular material with a low percentage of fines, from the Sucre region - Bolivia, classified as silty sand (SM), according to the Unified Classification System (USCS). Remoulded specimens were used, by means of the compaction tamping method in equal layers.

In order to study the volume and stress variations due to the load rate and shear speed during each stage of the unsaturated triaxial tests, two different load rates (32kPa / h and 128kPa / h) were applied to the samples. , during the initial isotropic compression stage of the triaxial test. Later, in the cutting stage of the trials, two cutting speeds were considered (0.5% / h and 2.5% / h) in drained condition. On the other hand, the drained tests were carried out under conditions of constant controlled suction (15kPa, 45kPa), thanks to the independent control and measurement of the water pore pressure and air pore pressure, allowing the use of the axis translation technique. .

The experimental results obtained during the isotropic compression stage show that the applied load rates have a not considerable effect on the variation of the specific volume of the selected samples. On the other hand, the cutting speeds applied in the cutting phase show a slight increase in the value of the peak shear stress in the stress-strain curve. Finally, the data obtained were compared with a previous investigation carried out by Rojas and Mancuso (2009), in which similar values of constant suction, as well as load rates and cutting speeds were used.

Keywords: unsaturated soil mechanics, triaxial test, load velocity, constant suction.

INTRODUCCIÓN

Las pruebas triaxiales de suelos en condiciones parcialmente saturadas, a diferencia de los suelos saturados, permiten el estudio de una gama más amplia de posibles condiciones de campo geotécnico bajo diferentes trayectorias de esfuerzos. La diferencia entre el comportamiento de un suelo saturado y no saturado, reside principalmente en la presencia de la succión en el caso de suelos parcialmente saturados. La succión de un suelo está compuesta de dos componentes: la succión matricial y la succión osmótica. Generalmente, la succión osmótica no está presente en los modelos constitutivos en suelos no saturados, mientras que la succión matricial es el componente que más influye en el comportamiento mecánico de los suelos. Entre los dos componentes de la succión, Fredlund y Rahardjo (1993) presentaron la importancia de la succión matricial en el comportamiento mecánico de los suelos insaturados. Al contrario de la succión osmótica, que tiene un efecto insignificante en la resistencia al corte del suelo (Katte y Blight, 2012). Esta succión matricial puede ser definida como la presión de poro de agua negativa respecto a la presión de poro de aire (Rahardjo et al., 2019).

El control triaxial de succión matricial en la muestra de suelo, se realiza generalmente por medio de la técnica de traslación de ejes (Hilf, 1956), utilizando sistemas separados de control de presión de aire y presión de poro de agua.

La mecánica clásica de suelos saturados describe la consolidación como la disipación de la presión del agua intersticial en el suelo y la deformación correspondiente en condiciones de carga constante, solo dependiendo de los parámetros de compresibilidad y permeabilidad. Por lo general, la teoría no tiene en cuenta la velocidad de carga. Por lo tanto, la implementación de pruebas de carga continua a diferentes velocidades permite el estudio de nuevos procedimientos y trayectorias de esfuerzos. La carga continua de suelos no saturados durante las pruebas triaxiales, generalmente se realiza durante la etapa de compresión (CRL), en condiciones de succión constante (controlada). Asimismo, la tasa constante de deformación (CRS) se utiliza durante la etapa de corte (desviador). Por otro lado, el enfoque de carga incremen-

tal (IL) consiste en una carga repentina y deformaciones de volumen rápidas en condiciones sin drenaje, que comprimen rápidamente el aire atrapado en los poros de suelo.

En cuanto a la literatura relacionada con las pruebas triaxiales de suelos parcialmente saturados y la tasa de carga, se muestra que los suelos arenosos no saturados de densidad media y alta densidad, tienen una propensión a mostrar dilatancia inducida por esfuerzos durante la prueba, seguida de un pico en el gráfico de esfuerzo cortante vs deformación y una fase posterior de ablandamiento, cuando se acerca al estado crítico. Alternativamente, los suelos arenosos sueltos tienen una compresión volumétrica durante la carga monótona, y un comportamiento de endurecimiento por deformación en la fase desviadora. Patil et al. (2015), realizaron varias pruebas triaxiales con el propósito de determinar las velocidades de corte adecuadas, concluyendo que velocidades de 0.054%/h eran apropiadas para estudios de alta succión en arenas limosas.

Rojas y Mancuso (2009), llevaron a cabo una serie de pruebas triaxiales con diferentes tasas de carga isotrópica y velocidades de deformación por corte, concluyendo que los efectos de las tasas de carga de consolidación en las muestras de arena piroclástica reconstituida, parecen ser insignificantes en el comportamiento durante la fase de compresión isotrópica.

Patil et al. (2014), mostró que las velocidades de corte lentas (0,174%/h) y medias (0,516%/h) en una arena limosa compactada, producían deformaciones volumétricas y tensiones desviadoras casi idénticas en las muestras. Sin embargo, la velocidad de corte más rápida (0,84%/h) provocó mayores deformaciones volumétricas y esfuerzos mayores de corte, lo que indica que dicha velocidad de deformación es insuficiente para disipar adecuadamente la presión de poro de aire y las presiones de poro de agua, bajo condiciones de drenaje en pruebas de succión constante.

En la presente investigación, se seleccionaron tasas de corte constante (CRS) adecuadas para pruebas triaxiales de un suelo no saturado (arena limosa) de 2.5(%/hr) y 0.5(%/hr).

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO TRIAXIAL

El equipo triaxial de suelos no saturados perteneciente a la Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca (Figura 1), desarrollado por Rojas (2006), en asociación con la empresa Megaris, es una variación del equipo triaxial original desarrollado por Bishop & Wesley (1975) y modificado por Rampino (1997). Entre las características más importantes del equipo, osee un sistema de doble drenaje con dos discos cerámicos HAEV de 5bar, fabricados por SoilMoisture, tanto en la base de la muestra como en la parte superior, lo cual permite una disminución en los tiempos de ensayo para cada muestra.



Figura 1. Equipo triaxial y módulo de control.



Figura 2. Sistema de medición de volumen.

DATOS DEL SUELO Y PROCEDIMIENTO

Se desarrolló un programa de pruebas de laboratorio para estudiar el efecto de la tasa de carga durante la etapa de compresión isotrópica y el efecto de la velocidad de corte durante la etapa de corte de la prueba triaxial. El diseño del programa de prueba se muestra en la Tabla 1.

	Succión matricial (kPa)	Esfuerzo neto (kPa)	Tasa de carga (kPa/h)	Velocidad de corte (%/h)
Compresión isotrópica	15	200	32	---
			128	
	45	200	32	---
			128	
Etapa de corte	15	200	32	0.5
				2.50
	45	200	32	0.5
				2.50

Tabla 1. Descripción del programa de ensayos

El suelo ensayado está clasificado como un suelo arena-limoso (SM), de acuerdo al Sistema de Clasificación Unificado (USCS), perteneciente a la región de Sucre-Bolivia, la Figura 3 describe su distribución de partículas.

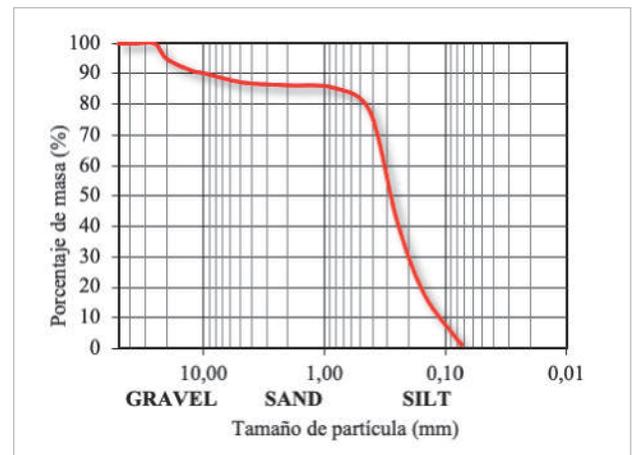


Figura 3. Descripción de sistema de medición de volumen.

USCS Clasificación	SM
Gravedad específica, G_s	2.67
Porcentaje de humedad, %w	8.00%
Relación de vacíos, e	0.48
Saturación, S	40.80%
Densidad, γ_w	19.44 kN/m ³
Densidad seca, γ_D	18.00 kN/m ³

Tabla 2. Descripción de parámetros del suelo analizado.

El programa de laboratorio se realizó en el suelo especificado bajo condiciones de compresión triaxial con succión matricial controlada de 15 y 45 kPa, a un esfuerzo neto de confinamiento promedio de 200kPa. Por otra parte, se tomó en cuenta dos velocidades de corte durante la fase deviatorica de 0.5%/h y 2.5%/h. Las muestras reconstituidas de 38mm de diámetro y 76mm de alto, fueron dinámicamente compactadas en base al método descrito por Ladd (1978), en 5 capas mediante un pistón y 25 golpes entre cada capa.

Figura 4. Descripción de muestra y herramientas de compactación.



Una vez compactada la muestra, es colocada cuidadosamente en el pedestal del triaxial encima el disco cerámico. Luego, se coloca una membrana de látex, al mismo tiempo que el cabezal con el disco cerámico superior es colocado y asegurado con "O-rings", tanto en la base como en la parte superior. Posteriormente, se coloca la celda interna de acero, la cual es llenada de agua desaireada hasta el nivel definido en el piezómetro. Finalmente, se instala la celda externa de acrílico y su malla de acero de seguridad, las cuales son aseguradas rígidamente con la tapa metálica del triaxial.

La muestra luego es sometida a una presión neta confinante (σ_3-u_a), y mediante el pistón del triaxial, se transmite un esfuerzo desviador aproximado de 5kPa, con el objetivo de confinar verticalmente a la muestra. Así como también, se procede a someter a la muestra a una succión matricial predeterminada (u_a-u_w), mediante la técnica de traslación de ejes. Se aplicaron presiones de poro de agua constantes de 30kPa en conjunto con presiones de aire de 45kPa y 75kPa, para obtener succiones de 15kPa y 45kPa respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primeramente, para que la muestra se encuentre en un estado de succión matricial constante, se aplican las presiones de agua y de aire, durante la fase de equalización, la cual es asumida como completada, cuando el volumen de flujo de agua a través del suelo, es casi nulo. Gracias al sistema de doble drenaje, los tiempos de equalización de las muestras son mucho menores en comparación a triaxiales de un solo drenaje (Rojas, 2006).

Una vez que las muestras se equalizaron en la succión inicial especificada (15 y 45 kPa), se realizaron etapas de compresión isotrópica hasta el valor máximo de confinamiento neto requerido (σ_3-u_a), mientras se mantiene la succión constante. Las tasas de carga aplicadas en las pruebas fueron 32 y 128 kPa/h. Para asegurar una disipación completa de las presiones de poro de agua y aire, cada muestra se consolida durante al menos 24-48h.

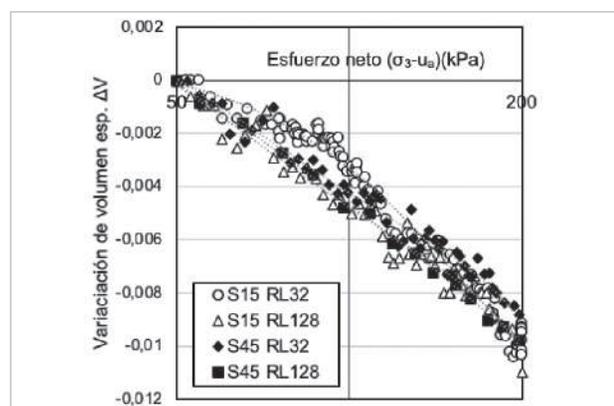


Figura 5. Variación de volumen específico en las muestras.

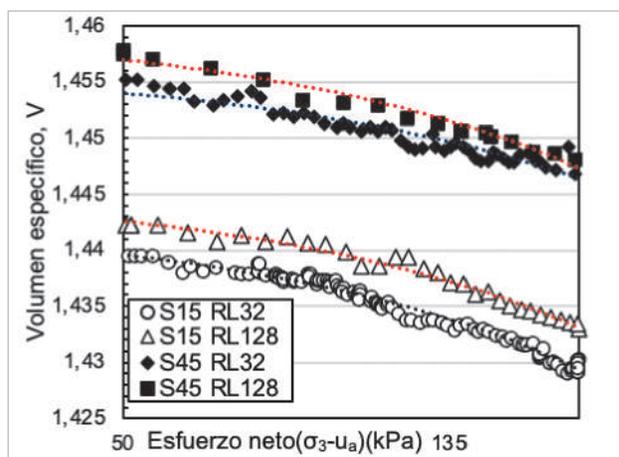


Figura 6. Volumen específico vs esfuerzo neto.

Muestra	Presión de preconsolidación p_o (kPa)	Compresibilidad $\lambda_{(s)}$
S15 RL32	106	0.0107
S15 RL128	109	0.0105
S45 RL32	118	0.0095
S45 RL128	120	0.0094

Tabla 3. Descripción de parámetros del suelo analizado

La Figura 8 presenta el esfuerzo desviador (q) frente a la deformación axial (ϵ_a), para muestras de arena limosa compactada reconstituida durante las pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD), con succiones constantes de 15 kPa y 45 kPa. Así como también, se muestran los diferentes valores de deformación axial constante en la etapa de corte de cada ensayo (0.5 y 2.5%/hr). Las curvas de esfuerzo-deformación trazadas indican que la velocidad de deformación afecta significativamente la resistencia máxima al corte, mostrando un mayor aumento en la resistencia al corte en las muestras con una succión de 45 kPa (13,3%). Las muestras con una succión de 15 kPa presentan una variación del 9,5% en la resistencia máxima en ambas velocidades de deformación.

Por el contrario, los resultados presentados por Rojas y Mancuso (2009), de pruebas experimentales bajo valores de succión y velocidades de corte similares, mostraron un aumento mínimo en la resistencia al corte que podría ser descrito por el autor como variaciones

experimentales normales. En contraste con los resultados observados por Patil et al. (2014), que mostraron un aumento de las resistencias máximas al corte bajo velocidades de deformación más rápidas de 0.014%/min en comparación con tasas más lentas de 0.0029%/min. Por otra parte, se observa un comportamiento frágil en los gráficos de deformación cortante, ya que la resistencia al corte disminuye repentinamente después de la ruptura de las muestras bajo una carga axial monótona. Generalmente, el valor de la deformación axial al que tienden a fallar las probetas es del 2-3,5%.



Figura 7. Rotura de muestra.

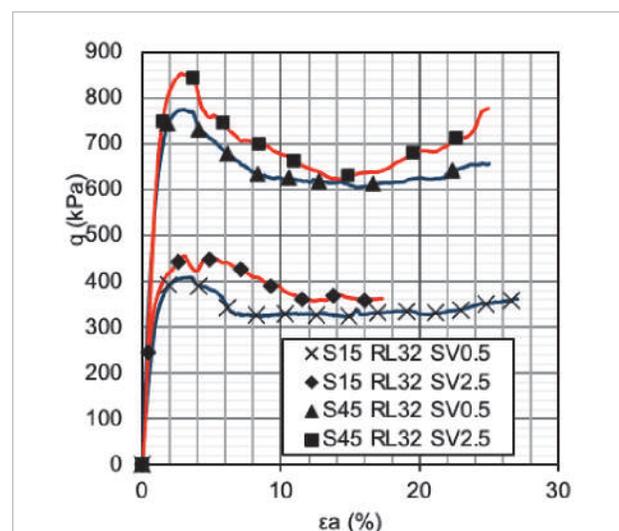


Figura 8. Gráfica q vs ϵ_a de muestras.

Como se observa en la Figura 8, el comportamiento de la deformación volumétrico-axial, muestra un aumento re-

pentino en el cambio de volumen, lo que indica la ruptura de cada espécimen durante la fase de corte. Los saltos de deformación volumétrica, se observan en los mismos valores de deformación axial donde se produce la resistencia máxima al corte en las muestras ensayadas. Este comportamiento volumétrico es diferente a los estudios presentados por Patil et al. (2014), Cattoni et al. (2007) y Rojas y Mancuso (2009), lo que indica una respuesta frágil del suelo analizado. Las muestras cargadas con la velocidad de deformación más rápida de 2,5%/h, muestran mayores cambios volumétricos a lo largo de la falla de corte, a diferencia de las muestras con velocidades de deformación más bajas (0,5%/h).

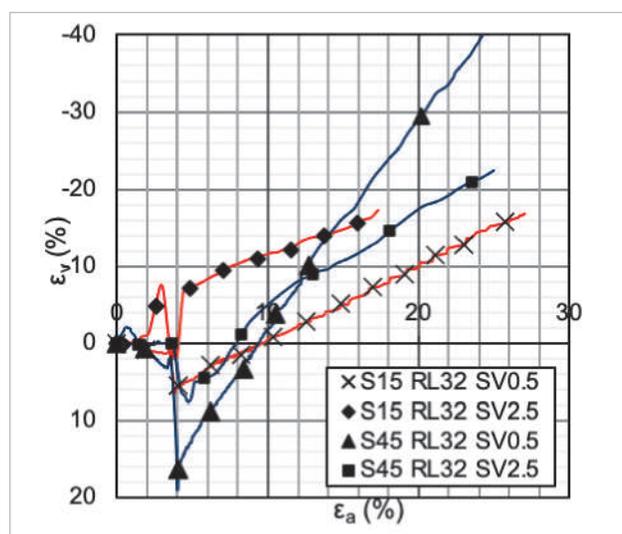


Figura 9. Gráfica de deformación volumétrica (ϵ_v) vs deformación axial (ϵ_a).

CONCLUSIONES

En esta investigación, se analiza un suelo parcialmente saturado de la región de Sucre (Bolivia), mediante pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD) en muestras reconstituidas bajo succiones constantes de 15 kPa y 45 kPa. Se seleccionaron tasas de carga isotrópicas apropiadas de 32 y 128 kPa/hr de acuerdo con trabajos previos de Rojas & Mancuso (2009), bajo valores de succión similares. Los cambios de volumen se midieron durante cada etapa triaxial. Los resultados obtenidos del corte bajo diferentes velocidades de deformación de 0.5 y 2.5%/hr, hicieron posible el estudio del comportamiento tensión-deformación del material reconstituido

seleccionado. Se observa que, bajo valores de succión bajos de 15 y 45 kPa, las variaciones de volumen específicas y la compresibilidad (λ_s) son consideradas insignificantes para diferentes tasas de carga, como se indica también en estudios anteriores de Rojas y Mancuso (2009). Sin embargo, el nivel de succión parece tener un efecto creciente sobre la presión de preconsolidación (p_0) y una disminución en la compresibilidad con mayor succión matricial.

Con base en los resultados obtenidos de las etapas de corte para el material reconstituido, la rigidez inicial y la resistencia máxima al corte son mayores en las muestras con 45 kPa de succión. La comparación entre los gráficos de tensión-deformación de ambas velocidades de corte (0,5% y 2,5%/hr) mostró un efecto significativo sobre el esfuerzo cortante desviador pico en las muestras. El esfuerzo máximo de corte a una velocidad de deformación del 2,5%/h es mayor que en el caso de la tasa de 0,5%/h. Por otro lado, el comportamiento de la deformación volumétrico-axial, muestra un gran cambio volumétrico bajo el mismo valor de deformación axial donde ocurre la falla por corte, lo que indica un comportamiento frágil de cada muestra de suelo.

Las diferencias de los resultados experimentales en condiciones de succión constantes similares, tasa de carga y deformación entre los estudios anteriores de Rojas y Mancuso (2009), pueden explicarse por las propiedades del material ensayado seleccionado, como la relación de vacíos inicial (e), la distribución granulométrica y la mineralogía, así como las diferentes técnicas de preparación de muestras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bishop A.W. & Donald, I.B. (1961). The experimental study of partly saturated soil in triaxial apparatus. *Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1:3, 13–21.
- Bishop, A.W., Wesley, L.D. (1975). A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Geotechnique*, 25, 657–670.

Cattoni, E., Cecconi, M. y Pane, V. (2007). Geotechnical properties of an unsaturated pyroclastic soil from Roma. *Bulletin Of Engineering Geology And The Environment*, 66:4, 403-414. doi: 10.1007/s10064-007-0096-z

Edil, T.B., Motan, S.E., Toha, F.X. (1981). *Mechanical behavior and testing methods of unsaturated soils*. Yong, R.N., Townsend, F.C. (eds.) Laboratory Shear Strength of Soil. ASTM STP 740, 114-129

Fredlund D.G. & Rahardjo H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley, New York.

Ladd R. (1978). Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1:1, 16-23, doi: 10.1520/gtj10364j

Laloui, L., Péron, H., Geiser, F., Rifa'i, A., Vulliet, L. (2006). Advances in volume measurement in unsaturated soil triaxial tests. *Soils and Foundations*, 46:3, 341-349.

Rojas Vidovic J. C. & Mancuso C. (2009). Effect of loading rate on the behaviour of unsaturated soils. *Proceedings Of The 17Th International Conference On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering*, 17:1-4, 761-764, doi:10.3233/978-1-60750-031-5-761

Katte V. & Blight G.E. (2012). The roles of surface tension and solute suction in the strength of unsaturated soils. *Unsat 2012 Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Naples, Italy, p. 5

Wheeler, S.J. (1988). The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles. *Geotechnique*, 38, 399-413

