

# Análisis comparativo del comportamiento bajo tasas distintas de carga en suelos arenosos en ensayos triaxiales no saturados

Barahona, C.<sup>a</sup>, Rojas, J.C.<sup>b</sup>

a Investigador en el área de geotecnia de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: christianbarahona07@outlook.com

b Docente en el área de geotecnia de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: geotecnia@gmail.com

Recibido: 26/03/2019

Aceptado: 26/03/2019

Publicado: 26/03/2019

## RESUMEN

La selección de una velocidad de carga adecuada es fundamental para determinar con precisión los cambios de volumen inducidos por el corte en la muestra y garantizar que la trayectoria de esfuerzo efectiva objetivo no se desvíe de la trayectoria de esfuerzos medida. Sin embargo, en pruebas triaxiales de suelos no saturados (pruebas UNSAT) a valores de succión constantes, la tasa de corte axial también debe ser lo suficientemente lenta para mantener el equilibrio de la succión matricial, así como la uniformidad en el contenido de agua a lo largo de la etapa de corte. Especímenes reconstituidos de muestras de arena limosa de Bolivia se comprobaron con muestras con propiedades geotécnicas similares de Italia presentadas por Rojas (2006), bajo una serie de pruebas triaxiales controladas por succión en un sistema de ensayos triaxial automatizado Bishop modificado; incluyendo las etapas de ecualización, compresión isotrópica y de esfuerzo desviador desarrolladas a diferentes tasas de carga isotrópica y de deformación, respectivamente. Durante las etapas de compresión isotrópica se han aplicado tasas de carga de 32 y 128 kPa/h bajo diferentes valores de succión (es decir, 15 y 45 kPa). Las etapas del desviador CD se han realizado a los mismos niveles de succión con velocidades de deformación de 0,25 y 2,50 %/h.

Los resultados indican un ligero aumento de la resistencia posterior al pico con la tasa de deformación más rápida (2,5 %/h) en el suelo boliviano probado, así como un efecto insignificante de la tasa de carga isotrópica a niveles de succión bajos (es decir, 15 y 45 kPa) en el suelo arenoso probado de ambos lugares.

**Palabras clave:** ensayo triaxial, suelo no saturado, tasa de carga.

## ABSTRACT

The selection of an appropriate shearing rate is critical for determining accurately shear induced volume changes in the specimen and ensuring that the target effective stress path does not diverge from the measured stress path. However, in triaxial testing of unsaturated soils (UNSAT testing) at constant suction values, the axial shearing rate should also be slow enough to maintain equilibrium of matric suction as well as uniformity in water content throughout the shearing stage. Reconstituted specimens of silty sand samples from Bolivia and Italy were tested under a series of suction-controlled triaxial tests on a modified Bishop automated triaxial test system; including equalization, isotropic compression and deviator stages developed at different stress-rate and strain-rate, respectively. During the isotropic compression stages the loading rates of 32 and 128 kPa/h have been applied under different suction values (i.e. 15 and 45 kPa). The CD deviator stages have been carried out at the same suctions levels under strain rates of 0.25 and 2.50 %/h.

The results indicate a slight post-peak strength increase under the faster strain rate (2.5%/hr) on the tested Bolivian soil as well as negligible effect of isotropic loading rate at low suction levels (i.e. 15 and 45kPa) on tested sandy soil from both locations.

**Key words:** loading rate, unsaturated soil, loading rate.

## INTRODUCCIÓN

En contraste con las pruebas de edómetro y corte directo, las pruebas triaxiales permiten una gama más amplia de trayectorias de esfuerzo, simulando diferentes condiciones de campo que se encuentran en la práctica geotécnica. El valor de entrada de aire de los discos cerámicos en los que normalmente se coloca la muestra de suelo limita el uso de la técnica de traslación del eje para imponer/controlar la succión durante las pruebas triaxiales de suelos no saturados.

Los suelos arenosos no saturados que originalmente están sueltos tienen una tendencia a comprimirse volumétricamente durante el corte monótono mientras presentan un endurecimiento por deformación. Por otro lado, los suelos arenosos no saturados densos a medianos tienen una tendencia a mostrar dilatación inducida por el esfuerzo, acompañada de un pico y un ablandamiento posterior al pico a medida que se acercan al estado crítico (Patil et al., 2015).

Huat (2006) concluyó que la tasa de carga de la tensión aplicada en un suelo residual granítico tiene un efecto pronunciado en la relación de vacíos y el grado de saturación, pero tiene un efecto insignificante en el contenido de agua del suelo sometido a una succión aplicada constante.

Con respecto a la carga de la velocidad de deformación, algunos trabajos previos de Patil et al. (2015) demostraron que tasas de corte más rápidas (0,84 %/h) aplicadas en muestras limosas no saturadas produjeron deformaciones volumétricas mucho más altas durante la etapa de corte, lo que indica indirectamente que la disipación adecuada del aire y agua intersticial no es posible a una velocidad de corte tan rápida, demostrando una influencia significativa de la velocidad de corte en el esfuerzo desviador máximo.

En este artículo, se presentan y analizan críticamente algunos de los principales resultados experimentales obtenidos en ensayos de compresión triaxial con diferentes tensiones y tasas de deformación, tanto en material reconstituido como en comparación con estudios anteriores con parámetros de ensayo similares, y se relacionan en el marco de estudios recientes sobre este tema.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas de laboratorio en muestras de suelo de arena limosa no saturada descritas en este documento consistieron en pruebas de compresión triaxial a succión constante, realizadas en muestras reconstituidas.

El material se sumergió preliminarmente en agua destilada durante 24 h, sometiéndose a varios ciclos de vacío.

Las propiedades iniciales de las muestras naturales se resumen en la Tabla 1.

Por lo general, las etapas de ecualización requerían aproximadamente de 3 a 4 días para cada incremento de succión.

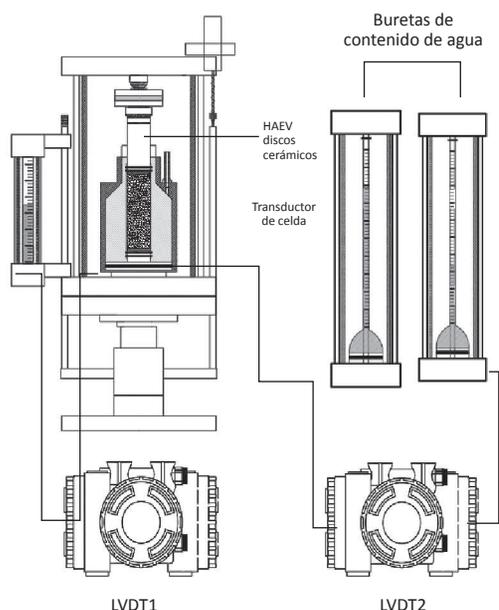
Los ensayos de compresión triaxial se realizaron mediante un sistema automatizado servo-controlado para suelos no saturados equipado con una celda triaxial de doble pared Bishop and Wesley modificada, fabricada por Megaris (Caserta, Italia). El prototipo de este aparato fue puesto en marcha por primera vez por Rojas (2009) y se describe completamente en Rojas (2008).

El sistema, que se muestra esquemáticamente en la Fig. 1, ha sido diseñado específicamente para probar muestras cilíndricas de 38 mm de diámetro y 76 mm de alto.

El fluido celular es aire; por lo tanto, la celda exterior de Perspex está rodeada por un escudo cilíndrico de acero. La succión se controla aplicando, controlando y midiendo valores positivos independientes de las presiones del aire intersticial y del agua intersticial (técnica de traslación del eje). Las deformaciones axiales fueron medidas por medio de transductores IVDT externos, mientras que las deformaciones volumétricas se infirieron a partir de las deformaciones radiales medidas. El sistema utilizado para determinar las deformaciones radiales consta de un cilindro interior de aluminio lleno de agua, que rodea la muestra; cualquier variación en el nivel del agua está relacionada con la deformación de la muestra. Se utiliza una bureta de vidrio, llena de agua y mantenida a la misma presión de celda, para fijar una presión de referencia.

Luego, se usa un transductor de presión diferencial (precisión de  $6,0 \times 10^{-3}$  kPa) para medir la diferencia de presión entre el agua contenida en la celda interna y la bureta de referencia.

El equipo adoptado para medir los cambios en el contenido de agua consta de dos buretas, una conectada al circuito de drenaje en la base del pedestal, debajo de la piedra porosa de alto valor de entrada de aire, la otra utilizada como nivel de referencia (Fig. 1). El agua que llena las buretas se mantiene a la misma presión de agua. En este caso, un transductor diferencial de presión se utiliza para medir la diferencia de nivel.



**Fig. 1** Sistema de medición en el aparato triaxial (adaptado de Rojas 2009).

Las pruebas de compresión triaxial sobre muestras reconstituidas se llevaron a cabo en tres etapas diferentes:

- (1) ecualización de succión a presión de celda constante.
- (2) compresión isotrópica a diferentes tasas de carga con succión constante.
- (3) corte drenado controlado por deformación a presión y succión de celda constantes.

La compresión isotrópica se realizó mediante carga continua a una velocidad de 32 kPa/h y 128 kPa/h, mientras que el corte se llevó a cabo a velocidades de desplazamiento de aproximadamente 0,38 mm/h (0,5 %/h) y 1,9 mm/h (2,5 %/h).

Los dos suelos utilizados para las pruebas presentadas en este documento corresponden a una arena limosa no plástica (SM) en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Se compone de 60% arena, 30% limo y 10% arcilla.

Las muestras reconstituidas se seleccionaron para mejorar la heterogeneidad de la muestra y obtener potencialmente un conjunto de datos más consistente.

En los resultados de las pruebas discutidos en este documento, todos los especímenes se prepararon utilizando el método de apisonamiento húmedo (MT). Los especímenes apisonados en húmedo se compactaron en cinco capas que tenían un espesor idéntico. Los modelos resultantes (es decir, las dimensiones internas del molde) tenían 38 mm de diámetro y 76 mm de altura.

La Tabla 1 resume el contenido de agua inicial ( $w_0$ ), la relación de vacíos ( $e_0$ ) y el grado de saturación ( $S_{r0}$ ) de todas las muestras.

**Tabla 1.** Propiedades de los suelos comparados

Origen de suelo	Sucre, Bolivia	Cava dei Tirreni, Italy
USCS Símbolo clasificación	SM	SM
Gravedad específica, $G_s$	2.67	2.68
Porcentaje de agua, %w	8.00%	28.5%
Relación de vacíos inicial, $e$	0.52	1.67
Saturación inicial, $S$	40.80%	46%

**Tabla 2.** Parámetros de ensayo para ambos tipos de suelos

	Succión Matricial (kPa)	Es-fuerzo neto (kPa)	Tasa de carga (kPa/h)	Vel. de de-formación (%/h)
Compresión isotrópica	15	200	32	---
			128	---
	45	200	32	---
			128	---
Esfuerzo des-viador	15	200	32	0.5
			32	2.50
	45	200	32	0.5
			32	2.50

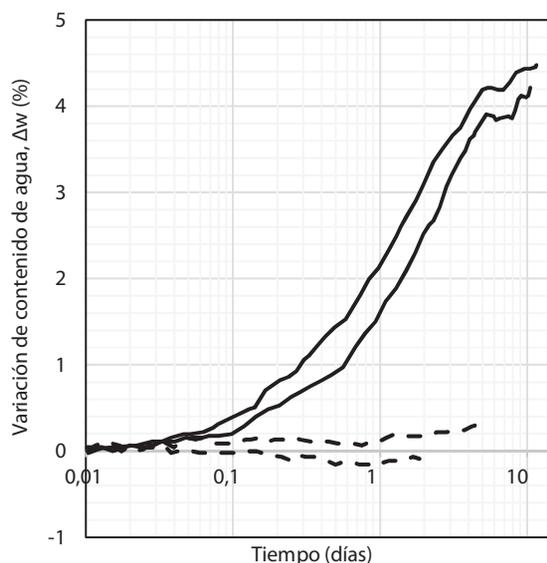
**RESULTADOS EXPERIMENTALES**

**Etapas de ecualización**

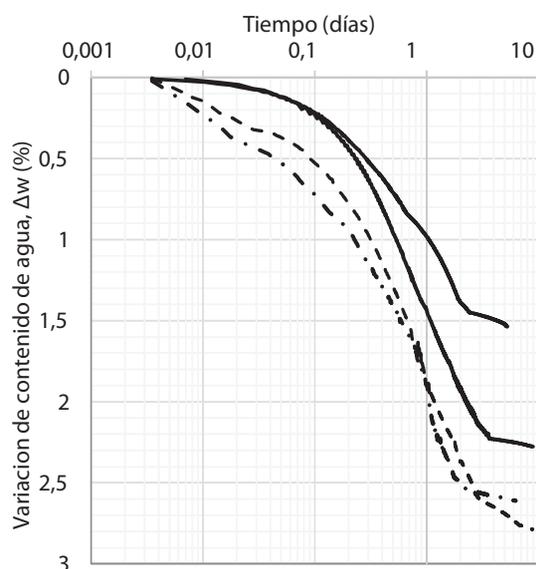
El propósito de la etapa de ecualización es permitir que la presión del agua intersticial dentro de la muestra igualara el valor de contrapresión seleccionado. Todas las etapas de ecualización se realizaron bajo una tensión de confinamiento neta constante ( $\sigma_3 - u_a$ ) de 50 kPa y una tensión desviadora ( $q$ ) de aproximadamente 5 kPa. Dichos valores se seleccionaron para evitar el colapso (es decir, disminuciones de volumen irreversibles al humedecerse) y para permitir la identificación de tensiones de fluencia incluso bajas en las etapas de compresión posteriores.

Los gráficos de ecualización de las Figuras 2 y 3 muestran que después de la compactación, la succión es de alrededor de 45 kPa para las muestras italianas. En realidad, para una succión inferior a este valor (es decir, 15 kPa) se produce un flujo de agua hacia el suelo (es decir, aumenta el contenido de agua de los especímenes probados),

similar al trabajo previo sobre arena limosa piroclástica de Rampino et al. (2000). Por otro lado, se observó el comportamiento contrario en las muestras bolivianas con un flujo ascendente hacia las buretas de medición como se ve en Patil (2014) y Cattoni et al. (2007), indicando un valor de succión inicial inferior a 15kPa.



**Fig. 2** Variación del contenido de agua en la etapa de eualización en muestras italianas (Rojas, 2006).

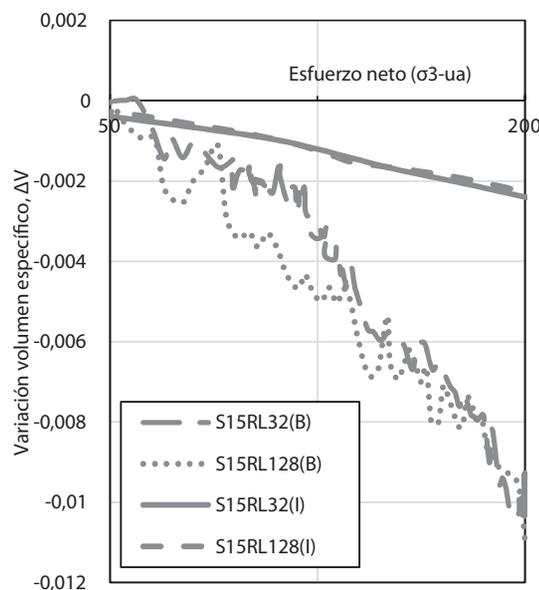


**Fig. 3** Variación del contenido de agua en la etapa de eualización, muestras de suelo Bolivia.

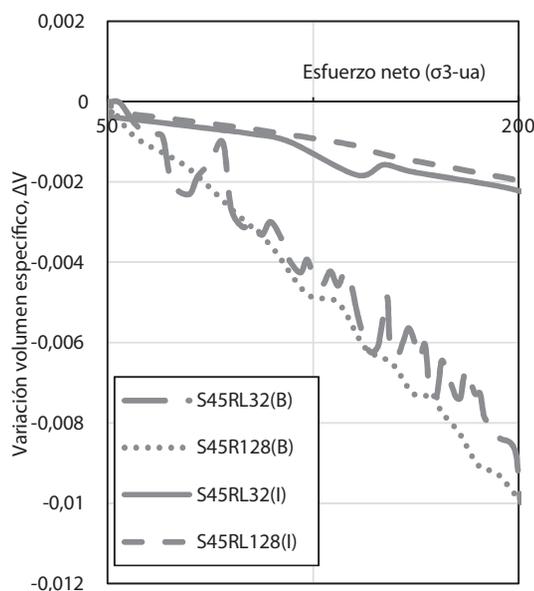
### Compresión isotrópica

Las etapas de compresión isotrópica se realizaron hasta el esfuerzo de confinamiento neto máximo requerido

( $\sigma_3 - u_a$ ), mientras se mantenía la succión constante en los extremos de la muestra después de que las muestras se igualaron a la succión inicial especificada (es decir, 15 y 45 kPa). Las tasas de carga aplicadas fueron 32 y 128 kPa. Para asegurar la completa disipación del agua y el aire de los poros, cada muestra de suelo se consolidó durante 24 horas. (Banerjee y Puppala, 2015).



**Fig. 4.** Compresión isotrópica en succión matricial de 15 kPa (32 and 128kPa/hr).



**Fig. 5.** Compresión isotrópica en succión matricial de 45 kPa (32 and 128kPa/hr).

Los datos experimentales para las pruebas de compresión isotrópica en muestras de succión de 15 kPa y 45 kPa se muestran en las Figuras 4 y 5, respectivamente. Como

se esperaba, las tasas de carga aplicadas parecen tener un efecto insignificante en la variación del volumen específico del espécimen en el rango de succión bajo. La ausencia del efecto de la tasa de carga en rangos de succión bajos para el suelo piroclástico analizado, y la arena limosa boliviana, respalda los resultados obtenidos por los autores de estudios experimentales previos realizados en estados de succión matricial mucho más bajos a través de técnicas de traslación de ejes. (Patil et al., 2014, Huat et al., 2006 y Cui & Delage, 1996). Los índices de compresibilidad y las presiones de preconsolidación obtenidos para estas pruebas se resumen en la Tabla 3.

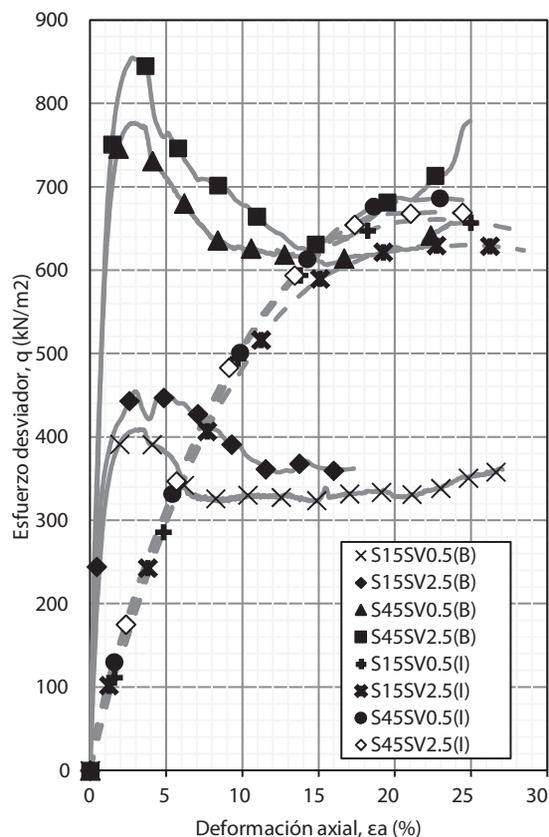
**Tabla 3.** Compresibilidad y presión de preconsolidación

Muestra	Presión de preconsolidación $p_0$ (kPa)	Compresibilidad $\lambda_{(s)}$
S15 RL32 (B)	106	0.0107
S15 RL128 (B)	109	0.0105
S45 RL32 (B)	118	0.0095
S45 RL128 (B)	120	0.0094
S15 RL32 (I)	51	0.163
S15 RL128 (I)	58	0.161
S45 RL32 (I)	60	0.169
S45 RL128 (I)	73	0.175

### Etapa de compresión

Como se especifica en la Figura 6, las muestras italianas presentan una fuerza máxima ligeramente más alta bajo velocidades de deformación por corte más lentas (es decir, 0,5 %/h) en comparación con las más rápidas (es decir, 2,5 %/h). Sin embargo, las diferencias en los valores obtenidos para las pruebas triaxiales de CD a diferentes tasas de carga son insignificantes y podrían atribuirse a la dispersión experimental estándar.

Por el contrario, las muestras bolivianas muestran un comportamiento frágil, mostrando una fase de ablandamiento después de alcanzar el esfuerzo cortante posterior al pico, similar al trabajo previo de Patil et al. (2015). Las muestras bajo la velocidad de deformación más lenta de 0,5 %/h (0,35 mm/h) muestran una ligera disminución del 11 % en la fuerza máxima en comparación con las muestras analizadas a 2,5 %/h (1,9 mm/h). Similar al trabajo previo de Cattoni et al. (2007), la resistencia máxima al corte para las muestras con un valor de succión de 45 kPa fue aproximadamente un 50 % mayor que las muestras de succión de 15 kPa. La resistencia máxima al corte se alcanzó con una deformación axial del 3 %, independientemente del nivel de succión.



**Fig 6.** Esfuerzo desviador vs deformación axial en ambas velocidades de corte

### CONCLUSIONES

Se investigó el efecto de la tasa de carga en suelos parcialmente saturados para determinar una tasa de carga adecuada para pruebas de succión constante y para comparar el comportamiento de muestras de suelo con una clasificación de suelo similar, pero con diferentes orígenes de sitio.

A valores de succión bajos (15 y 45 kPa), las tasas de carga aplicadas parecen tener poco efecto sobre las variaciones de volumen específico. El impacto sobre las presiones previas a la consolidación no es insignificante, pero es menor.

Las pruebas monotónicas triaxiales drenadas en muestras bolivianas revelaron una rigidez tangente inicial que no pareció verse afectada por el nivel de succión o la velocidad de deformación, en contraste con la rigidez secante en el esfuerzo desviador máximo.

Diferentes velocidades de deformación mostraron ligeras variaciones en la pendiente, y se observó una diferencia más notable entre muestras con diferentes niveles de succión impuesta.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Banerjee, A., Puppala, A.J., 2015. Influence of rate of shearing on strength characteristics of saturated and unsaturated silty soil. *50th Indian Geotechnical Conference*, Pune, India.
- Cattoni, E., Cecconi, M., Pane, V., 2007. Geotechnical properties of an unsaturated pyroclastic soil from Roma. *Bull Eng Geol Environ*, 66, 403–414. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0096-z>.
- Cui, Y., & Delage, P. (1996). Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, 46(2), 291-311. <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.2.291>.
- Huat, B., Ali, F., & Choong, F. (2006). Effect of loading rate on the volume change behavior of unsaturated residual soil. *Geotechnical And Geological Engineering*, 24(6), 1527-1544. doi: 10.1007/s10706-005-3366-1
- Ladd, R.S., 1978. Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 8.
- Patil, U.D., Puppala, A.J., Hoyos, L.R., 2014. Assessment of Suitable Loading Rate for Suction-Controlled Triaxial Testing on Compacted Silty Sand via Axis-Translation Technique, *Geo-Congress 2014 Technical Papers*, 234, 1307-1316
- Patil, U., Hoyos, L., & Puppala, A. (2015). Suitable Shearing Rate for Triaxial Testing of Intermediate Soils under Vapor Controlled Medium to High Suction Range. *IFCEE 2015*. doi: 10.1061/9780784479087.198.
- Rampino, C., Mancuso, C., Vinale, F., 2000. Experimental behaviour and modelling of an unsaturated compacted soil 37, 16.
- Rojas, J.C., 2008. Loading Rate Effect On The Mechanical Behaviour Of A Pyroclastic Soil. *Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italy*.



192



MasterRents  
978-762-RENT  
MasterRents.com



**CAT** 236D

TWO SPEED

12-16.5-15  
12-16.5-15  
12-16.5-15

SKS 532

CAMSO

SKS 532

