

Modificación de un equipo triaxial convencional para la ejecución de ensayos triaxiales especiales en muestras prismáticas

Modification of a conventional triaxial equipment for the execution of special triaxial tests on prismatic samples

Tomás Romero, Miguel A. Mánica, Efraín Ovando, Mario Flores & Enrique R. Gómez

Instituto de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, TRomeroO@iingen.unam.mx

RESUMEN: La interpretación de los resultados experimentales del comportamiento en reblandecimiento post-pico de los materiales cuasi-frágiles es un proceso bastante complejo debido a la concentración irreversible de las deformaciones plásticas conocida como localización de la deformación. Debido a que este proceso se deriva de la distribución no homogénea de las deformaciones, interpretar las curvas esfuerzo-deformación a partir de medidas globales pierde objetividad. En realidad, el comportamiento resultante, en especial posterior a la resistencia pico, no depende solamente de la respuesta constitutiva del material, sino que se vuelve un problema de contorno complejo en donde la configuración específica de la deformación localizada (e.g. el patrón de fracturamiento) afecta la respuesta observada. Lo anterior es particularmente problemático cuando se pretende utilizar los resultados de ensayos experimentales para la calibración del comportamiento en reblandecimiento de algún modelo constitutivo capaz de simular objetivamente el proceso de reblandecimiento (i.e. formulaciones regularizadas). En este contexto, el presente trabajo plantea la modificación de una cámara triaxial en donde se busca controlar el proceso de localización con el fin de proporcionar un problema de contorno claro y fácil de reproducir numéricamente para la calibración del comportamiento en reblandecimiento de una cierta formulación regularizada.

ABSTRACT: The interpretation of experimental results regarding the post-peak softening behavior of quasi-brittle materials is a rather complex process due to the irreversible concentration of plastic deformations known as strain localization. Since this process arises from the non-homogeneous distribution of deformations, interpreting stress-strain curves based on global measurements loses objectivity. In reality, the resulting behavior, especially after reaching peak strength, depends not only on the material's constitutive response but also becomes a complex boundary problem where the specific configuration of localized deformation (e.g., fracture patterns) affects the observed response. This becomes particularly problematic when attempting to use experimental test results to calibrate the softening behavior of a constitutive model capable of objectively simulating the softening process (i.e., regularized formulations). In this context, the present work proposes the modification of a triaxial equipment where the localization process is controlled, in order to provide a well-defined and numerically reproducible boundary problem for calibrating the softening behavior of a particular regularized formulation.

KEYWORDS: localización de la deformación, ensayo triaxial, pedestal sin fricción, muestra prismática.

1 INTRODUCCIÓN

Existen geomateriales que presentan un comportamiento mecánico cuasi-frágil bajo carga desviadora. Dicho comportamiento es el resultado de una combinación de complejos procesos que incluyen su sedimentación, compactación gravitacional (consolidación), su descarga y expansión por procesos geológicos (preconsolidación) y su posible cementación (Gens, 2013). Las curvas esfuerzo-deformación de estos materiales muestran un pico aparente en la resistencia seguido por un decremento de esta a medida que se incrementan los desplazamientos (etapa de reblandecimiento) hasta alcanzar un estado residual en donde la resistencia no disminuye al incrementar la deformación (Gens 2013; Mánica et al., 2018). Dentro del proceso de reblandecimiento se han distinguido dos estados principales. El primero ocurre inmediatamente después del pico y está asociado con la degradación y la rotura de la cementación. El segundo, se atribuye al pulido y reorientación de

las partículas sobre la superficie de rotura y tiende a la resistencia residual. La resistencia que separa los dos estados de reblandecimiento fue designada por Burland (1990) como la resistencia post-ruptura, y parece coincidir con la resistencia totalmente reblandecida definida por otros autores (Mesri & Shahien, 2003; Skempton, 1970).

Cuando se presenta reblandecimiento, el campo de deformaciones resultante generalmente no es homogéneo y las deformaciones posteriores a la resistencia pico tienden a concentrarse en zonas limitadas del material en la forma de bandas de corte, superficies de deslizamiento o fracturas. Esta concentración irreversible de las deformaciones en el estado post-pico de resistencia se conoce como localización de la deformación (Desrues & Viggiani, 2004). Algunos de los geomateriales que exhiben reblandecimiento y localización de la deformación son las arenas, las arcillas sensitivas y las arcillas cementadas (Alshibli et al., 2000; Gao et al., 2015; Gylland et al., 2014). Se ha observado en laboratorio que la localización afecta

la respuesta esfuerzo-deformación y que la concentración de las deformaciones en múltiples o en un solo plano de falla depende principalmente de la densidad inicial del espécimen, las heterogeneidades particulares del espécimen, la tendencia a dilatarse o comprimirse y, principalmente, de las condiciones de contorno impuestas. En ese sentido, las hipótesis usuales en la interpretación de ensayos en este tipo de geomateriales, particularmente en donde se asume que las deformaciones son homogéneas en la probeta, pierden totalmente objetividad y limitan nuestra capacidad para entender el fenómeno de localización, que a su vez controla el comportamiento mecánico en reblandecimiento del geomaterial en o cerca de falla (Sachan & Penumadu, 2007). Lo anterior resulta particularmente problemático cuando se pretende utilizar los resultados experimentales esfuerzo-deformación nominales para la calibración de parámetros de reblandecimiento que forman parte de modelos constitutivos regularizados capaces de simular el proceso de localización de manera objetiva. A partir de simulaciones numéricas de problemas de contornos complejos que utilizan este tipo de modelos constitutivos, se ha puntualizado la importancia en la selección del parámetro que controla la velocidad de reducción de resistencia post-pico (tasa de reblandecimiento) a partir de pruebas de laboratorio especiales. Se ha demostrado que la capacidad de carga, por ejemplo, de una cimentación sobre un material que exhibe reblandecimiento, no solo depende de la resistencia pico y residual del material, sino que es dependiente de la tasa de reblandecimiento y de la no homogeneidad del campo de esfuerzos/deformaciones desarrollado (Mánica et al., 2020).

Una posible solución a la problemática descrita podría ser tratar de controlar el patrón de localización a partir de condiciones de contorno especiales impuestas a las muestras dentro del equipo triaxial utilizado. La intención es tener un problema de contorno simplificado que, a diferencia de las simulaciones de modelos de especímenes cilíndricos, resulte fácil de idealizar numéricamente y que, además, permita calibrar de manera adecuada los parámetros de reblandecimiento de las formulaciones regularizadas utilizadas. Por lo anterior, en este artículo se presenta el diseño de un sistema que reduce los esfuerzos friccionantes en el pedestal de un equipo triaxial y que permite el desplazamiento lateral de cuerpo rígido del espécimen una vez que ha ocurrido el fracturamiento. El sistema se ha idealizado para realizar pruebas triaxiales especiales en especímenes prismáticos de una mezcla homogénea de caolín y cemento Portland con discontinuidades impuestas que permiten controlar razonablemente el proceso de localización proporcionando una alternativa para la calibración modelos y formulaciones numéricas capaces de simular el proceso de reblandecimiento.

2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

Para la ejecución de los ensayos se conformaron probetas prismáticas de 78.5 mm de lado y 165 mm de altura de una mezcla homogénea de caolín y cemento Portland al 18% (en peso). La mezcla fue preparada con un contenido de agua igual a 1.5 veces el límite líquido (Burland, 1990). El caolín fue caracterizado de acuerdo con las Normas ASTM D4318-00 y D854-02, y tiene un límite líquido LL promedio de 55%, un límite plástico LP de 35%, un índice de plasticidad IP de 20% y una gravedad específica G_s de 2.48. Por su parte, el cemento utilizado se trata de un cemento Portland compuesto clase 30 de resistencia rápida (CPC 30 R) y corresponde a un cemento tipo 1 de acuerdo con la norma ASTM C150-11.

El caolín y el cemento fueron mezclados inicialmente en seco para garantizar la homogeneidad de la mezcla. Posteriormente, se agregó de forma gradual agua destilada y se utilizó una batidora industrial con aspa de globo para mezclar uniformemente hasta

alcanzar una especie de lodo líquido (Figura 1a). La mezcla fue vertida en tres capas en moldes especiales de aluminio anodizado. Se conformaron probetas con y sin discontinuidades para el control de la localización (Figura 1b). Las discontinuidades son elementos sólidos de 3.0 cm de longitud y 1.0 mm de espesor colocadas en los laterales con un ángulo de inclinación de 55.45° que garantiza una longitud libre para la formación de la falla en la muestra de 7.8 cm, aproximadamente. Las características de estos elementos fueron establecidas de acuerdo con investigaciones en donde se impusieron discontinuidades a muestras de material cementado para el estudio del proceso de falla localizada (Yang et al., 2008, Fujii & Ishijima, 2004). Inmediatamente posterior a la conformación de las probetas, estas se sumergieron en un recipiente con agua por un lapso de 24 horas (Figura 1c). Una vez finalizado este tiempo, fueron desmoldadas y nuevamente sumergidas por un periodo restante de 100 días. El tiempo de fraguado fue diseñado de tal manera que no se tengan diferencias en el comportamiento esfuerzo-deformación dependientes del mismo.

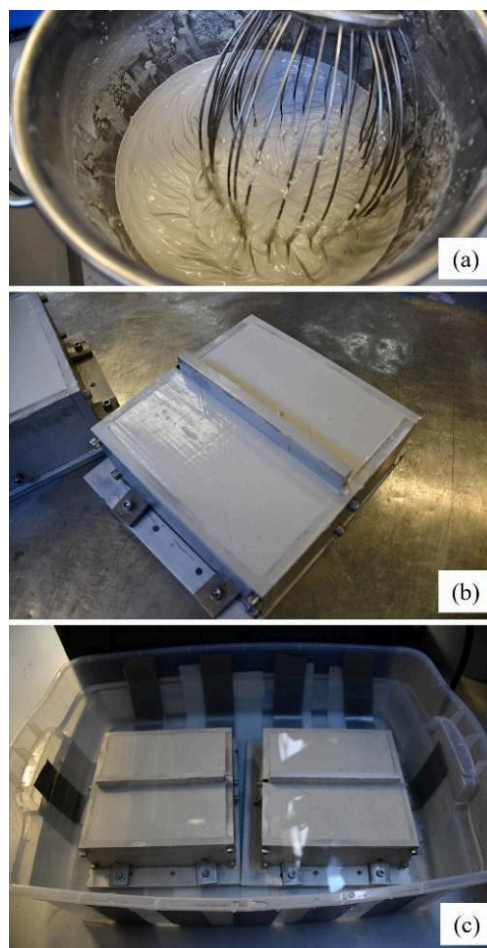


Figura 1. Proceso de conformación de las muestras ensayadas.

3 DISEÑO DE PEDESTAL

Los contornos friccionantes utilizados en ensayos triaxiales convencionales ocasionan no uniformidad en los estados de esfuerzo y deformación a lo largo del espécimen durante la aplicación externa de carga o desplazamiento. La principal fuente

de esta es el esfuerzo cortante desarrollado en la dirección radial de los extremos friccionantes, el cual causa el efecto de abarrilado, o, en su caso, un estado de falla prematuro localizado.

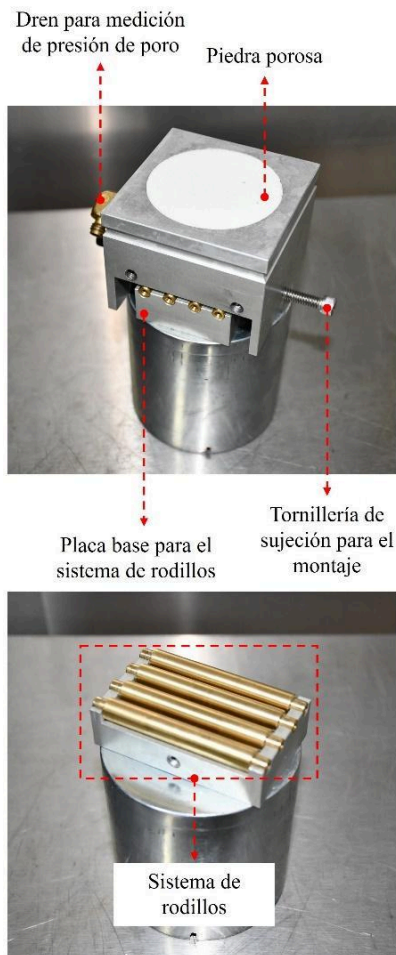


Figura 2. Diseño de pedestal con sistema de rodillos.

Los primeros intentos para la reducción de las fricciones en los contactos se basan en uso de terminaciones lubricadas con grasa sintética. Los experimentos realizados por Sachan (2011), demostraron que deformaciones monotónicas permiten que el exceso de presión de poro aumente de manera más uniforme dentro de la muestra del geomaterial, lo que indica el fuerte impacto de las condiciones de contorno del espécimen en su respuesta ante carga desviadora. Adicionalmente, con la intención de estudiar más a detalle el proceso de localización, se han realizado ensayos en deformación plana que integran sistemas especiales que buscan reducir los efectos friccionantes en los pedestales de los equipos y, con ello, garantizar el deslizamiento en la dirección horizontal. Estos ensayos han sido realizados principalmente en arenas, y se han utilizado sistemas con rodillos (Yao et al., 2018), sistemas con cojinetes lineales de desplazamiento (Viaggiani et al., 1994; Rechenmacher, 2005; Ni et al., 2018) y sistemas de cojinetes con balines (Alabdullah, 2010).

Tomando como referencia las investigaciones anteriores, se diseñó un pedestal de base cuadrada de 78.7x78.5 mm con piedra porosa y dren para la medición de presión de poro, el cual es

montado sobre un sistema que permite el deslizamiento lateral. Con la finalidad de tener los mejores resultados posibles, se diseñaron dos sistemas de deslizamiento distintos. El primero se trata de una placa base ranurada que mantiene en posición a cuatro rodillos de latón de 7 mm de diámetro posicionados a una distancia 10 mm entre centros, y que se acoplan a un canal en la parte inferior del pedestal para permitir únicamente desplazamientos en una dirección horizontal (Figura 2). El segundo corresponde a un arreglo de 20 balines de acero inoxidable de 10 mm posicionados a una distancia equidistante de 16 mm entre centro en ambos sentidos dentro una lámina perforada del mismo material. Este sistema se encuentra colocado entre dos placas de aluminio anodizado acanaladas que posibilitan el desplazamiento de los balines únicamente en una dirección horizontal (Figura 3).



Figura 3. Diseño de pedestal con sistema de balines.

Ambos sistemas cuentan con tornillería de sujeción que permite el ensamblaje y la correcta alineación de la muestra respecto al cabezal y pistón de carga del equipo triaxial. El cabezal tiene las mismas dimensiones y características que el pedestal. Debido al tamaño de la probeta, es indispensable garantizar el drenaje por ambos contornos. Una vez aislada la muestra con la membrana de látex, y posicionada correctamente, la tornillería de sujeción es retirada y se procede a llenar la cámara triaxial con el fluido confinante.

4 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO Y DE LOS ENSAYES TRIAXIALES EJECUTADOS

Los ensayos fueron realizados en un equipo triaxial con una cámara de acrílico de 254.8 mm de diámetro promedio, 12.8 mm de espesor, y una altura de 420 mm. La cámara es capaz de soportar niveles de confinamiento de hasta 900 kPa. La carga fue aplicada utilizando un equipo MTS con una capacidad de 500 kN. Para las mediciones nominales carga-desplazamiento, se utilizó una celda de carga de 50 kN y un transductor de desplazamiento LVDT con 127 mm de carrera. La precisión de los transductores de carga y desplazamiento es de 0.25 kN y 0.05 mm, respectivamente. Los ensayos fueron realizados bajo condiciones consolidadas no drenadas de acuerdo con la norma ASTM D-4767. Evaluar el sistema de desplazamiento bajo estas condiciones es ideal para observar el comportamiento de la presión de poro durante el ensaye y obtener las trayectorias de esfuerzo efectivo correspondientes.

Para aislar las probetas, se utilizó una membrana de látex de 100 mm de diámetro y 0.03 mm de espesor, 4 o-rings de 80 mm de diámetros colocados en el cabezal y pedestal, y se colocó grasa de silicón en los contactos contornos-látex para eliminar por completo las posibles fugas. Es importante mencionar que las dimensiones largo-ancho de las muestras prismáticas se idealizaron de tal manera que el perímetro de estas fuera el mismo que el de las membranas de látex. De esta manera se buscó eliminar por completo los efectos de la rigidez de la membrana de látex en el desarrollo de la zona de localización y confirmar lo que algunos investigadores han mencionado en investigaciones pasadas. Por ejemplo, Head (1986) demostró que cuando el suelo se corta a lo largo de un solo plano de falla, tanto en ensayos triaxiales como biaxiales, la membrana se estirará siguiendo la zona localizada. Sin embargo, este estiramiento no es significativo y el efecto generalmente puede ser ignorado. Asimismo, Mokni & Desrues (1999), a partir de un programa de pruebas en deformación plana, concluyeron que el uso de la membrana de látex no afecta el comportamiento de la muestra ni el inicio de la localización. Adicionalmente, Desrues & Hammad (1989) determinaron que los efectos de la membrana disminuyen a medida que aumenta la presión de confinamiento y, por lo tanto, se vuelven relativamente menos importantes a presiones de confinamiento altas.

Por otra parte, las muestras fueron saturadas utilizando contrapresión. La saturación se logró a partir de etapas incrementales de esfuerzo de 100 kPa. El esfuerzo aplicado se mantuvo constante hasta lograr la completa estabilización de la presión de poro a través de la muestra. La diferencia entre la presión confinante y la contrapresión siempre fue de 5 kPa. Al finalizar cada etapa de saturación, se realizó la medición del parámetro B de Skempton (1954) como una medida de la saturación del material durante este proceso. Las muestras se consideraron totalmente saturadas posterior a un incremento en la contrapresión de 500 kPa. A partir de este nivel de esfuerzo, se obtuvieron valores de B superiores a 0.95 y mediciones de cambio volumétrico muy bajos. Una vez finalizado el proceso de saturación, las muestras fueron consolidadas al esfuerzo efectivo requerido cuidando siempre estar por debajo del límite impuesto por la cámara triaxial. El tiempo de consolidación fue de 12 horas con la intención de garantizar el equilibrio de los esfuerzos bajo condiciones drenadas. A partir de las curvas de consolidación obtenidas se determinó la velocidad de aplicación de desplazamiento ideal. Los ensayos fueron realizados a una velocidad de 0.1 mm/min y se aplicó un desplazamiento vertical máximo de 15 mm.

El programa experimental contempló un ensaye con espécimen homogéneo y con pedestal fijo, un ensaye con discontinuidad y con el sistema de desplazamiento de rodillos, y un ensaye con discontinuidad y con el sistema de desplazamiento de balines. Estos tres ensayos se realizaron a un esfuerzo efectivo de 300 kPa. Una vez se identificó el sistema con mejores

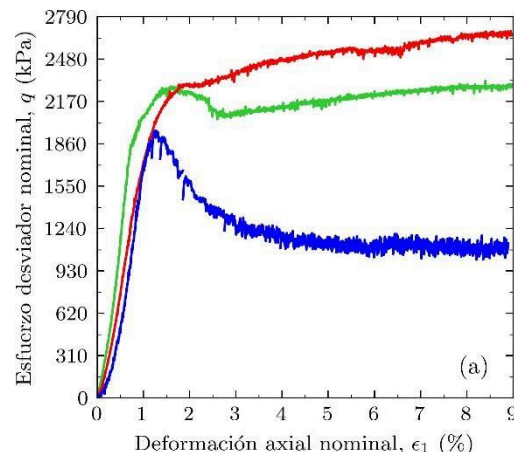
resultados, se realizaron tres ensayos más con la misma configuración, pero aplicando 200, 400 y 500 kPa de esfuerzo efectivo confinante. La finalidad de estos ensayos fue identificar las envolventes de resistencia y, con ello, evaluar de manera más objetiva, el comportamiento observado en los ensayos principales.

Es importante mencionar que la forma de los especímenes ensayados no influye de forma significativa en el comportamiento mecánico pre-pico del material. Zheng et al. (2022), a partir de ensayos prismáticos y cilíndricos bajo distintos esfuerzos confinantes, observaron que los parámetros mecánicos, como la resistencia pico, el ángulo de fricción interna, la cohesión y el módulo de Young son consistentes entre sí. En este sentido, es posible afirmar que el comportamiento del material hasta la resistencia pico no depende de la geometría de la muestra.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 4 se presentan los resultados nominales de los ensayos con pedestal fijo y modifica utilizando los sistemas de desplazamiento diseñados. En la Figura 4a se muestran las curvas esfuerzo-deformación, y en la Figura 4b los resultados del incremento de la presión de poro. En color verde se presenta el comportamiento de la probeta homogénea con pedestal fijo, en rojo el comportamiento con discontinuidad utilizando el sistema de rodillos y en azul el comportamiento con discontinuidad utilizando el sistema de balines. En primera instancia, es posible observar que la muestra intacta presenta un módulo elástico aparente ligeramente superior al de las muestras con discontinuidades. Es posible que lo anterior se deba al acoplamiento del sistema de desplazamiento y no a la presencia de la discontinuidad en el medio. Lo segundo que podemos identificar es que el sistema con balines fue el más eficiente. Esto nos indica que, independientemente que tengamos discontinuidades en la probeta, el uso de un sistema de desplazamiento que reduzca de manera eficiente la fricción y las tensiones en el contorno inferior, es indispensable para no afectar el comportamiento en reblandecimiento del material.

Para tener más claro lo indicado de manera gráfica, en la Figura 5 se presentan los resultados físicos obtenidos. En la Figura 5a se muestra el patrón de localización desarrollado en la probeta homogénea, en la Figura 5b el desarrollado con el sistema de rodillos y en la Figura 5c con el sistema de balines. Se puede observar que, a diferencia del sistema de rodillos, el sistema de balines permite el desplazamiento lateral de cuerpo rígido de la probeta una vez que localiza en la dirección impuesta. Adicionalmente, en la Figura 5a es posible visualizar que, a pesar de que se utilizó un pedestal fijo, se presentó localización de la deformación posiblemente a consecuencia de heterogeneidades dentro de la muestra conformada que no son identificadas a simple vista.



4

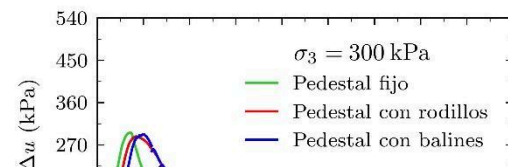


Figura 4. Resultados nominales: (a) curvas esfuerzo-deformación; (b) curvas de incremento de presión de poro.

Si relacionamos los resultados gráficos (Figura 4) con lo observado de manera física (Figura 5) es posible notar que el comportamiento pre-pico de los ensayos en donde el pedestal se mantiene inmóvil es bastante similar. Sin embargo, presentan una diferencia significativa en el comportamiento post-pico, la cual está relacionada con el patrón de falla que se generó en la muestra homogénea sin discontinuidad (Figura 5a). Lo anterior, confirma que el comportamiento en reblandecimiento no depende solamente de la respuesta constitutiva del material, sino que está asociado directamente al proceso de localización de la deformación. Lograr que la muestra presente un reblandecimiento paulatino hasta llegar a un estado de post-ruptura y, finalmente, a un estado residual, depende de las condiciones de contorno impuestas a la muestra de suelo. En este sentido, la diferencia en la resistencia pico alcanzada con el sistema de balines (Figura 4a en línea color azul) parece estar asociada únicamente al proceso de localización que se logra como consecuencia de la discontinuidad impuesta y del grado de libertad permitido durante el ensayo (Figura 5c).

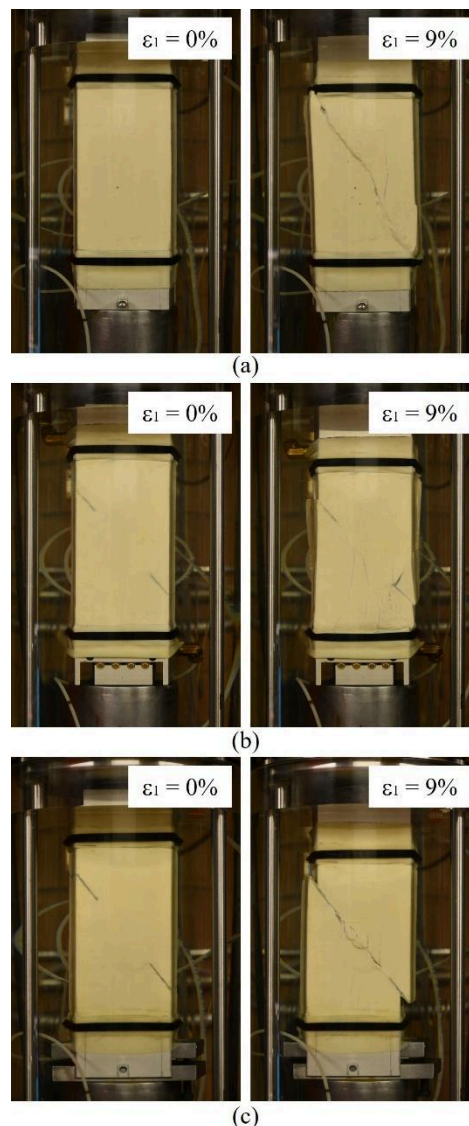


Figura 5. Patrón de localización desarrollado: (a) muestra homogénea; (b) muestra con discontinuidad y sistema de rodillo; (c) muestra con discontinuidad y sistema de balines.

De los resultados de presión de poro (Figura 4b), podemos observar que el nivel de presión en el estado en compresión y dilatante es similar en los tres ensayos. Asimismo, la dilatación en cada uno de ellos inició antes de alcanzar la resistencia máxima. Sin embargo, en las muestras donde el pedestal se mantuvo inmóvil, la reducción de la presión de poro generada ocurrió en un lapso menor que en la muestra con pedestal libre en donde los esfuerzos radiales y de tensión son menores.

Considerando que el sistema de balines es el que derivó en mejores resultados, se realizaron ensayos adicionales a distintos niveles de esfuerzo efectivo confinante aplicando el mismo nivel de deformación. Los resultados indicaron que, independientemente del nivel de esfuerzo aplicado en cámara, el funcionamiento del sistema es consistente y permite que se genere el proceso de localización de manera eficiente en la

dirección impuesta. En la Figura 6 se muestra un ejemplo del patrón de localización obtenido.

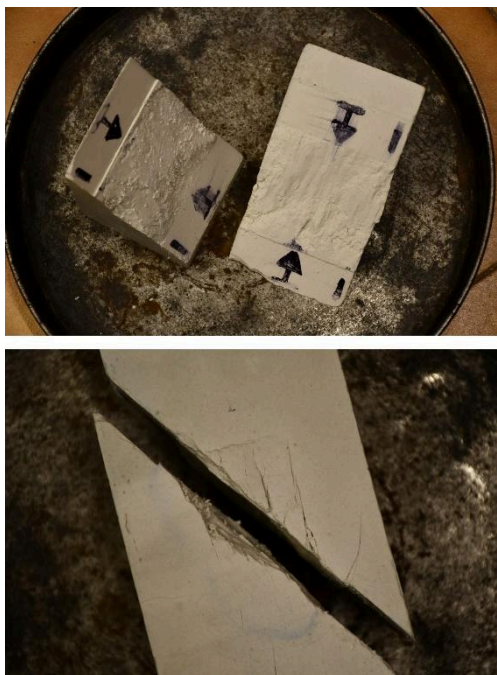


Figura 6. Patrón de localización desarrollado a partir de la discontinuidad impuesta y el uso del sistema de balines.

A partir de las trayectorias de esfuerzo efectivo resultantes se obtuvieron los envolventes de resistencia pico y post-ruptura del material idealizado (Figura 7). De esta manera, fue posible entender con mayor claridad la diferencia en los resultados obtenidos en los tres ensayos principales. En la Figura 8 se presentan las trayectorias de esfuerzo de estos. En color verde se presenta la trayectoria de la probeta homogénea, en rojo la trayectoria correspondiente a la muestra con discontinuidad y pedestal con rodillos, y en azul a la muestra con discontinuidad y pedestal con balines.

En los ensayos en donde el pedestal se mantuvo inmóvil (líneas roja y verde en la Figura 8), las trayectorias tienden siempre a buscar la envolvente de resistencia máxima como consecuencia de los esfuerzos generados en los contornos. Sin embargo, la trayectoria que resulta del sistema de balines, una vez toca la envolvente máxima de resistencia, se moviliza hasta un estado post-ruptura en donde se pierde parte de la cohesión y existe una ligera reducción del ángulo de fricción interna del material. El resultado anterior, destaca la importancia de modificar las condiciones de contorno utilizadas en los ensayos triaxiales convencionales para determinar los parámetros mecánicos en geomateriales cuasi-frágiles. El uso de sistemas que permitan controlar el proceso de localización es una alternativa factible para la calibración del comportamiento en reblandecimiento en el contexto de formulaciones regularizadas. Si seguimos caracterizando este tipo de materiales a partir de ensayos triaxiales convencionales, es un hecho que estamos subestimando el comportamiento post-ruptura de los mismo.

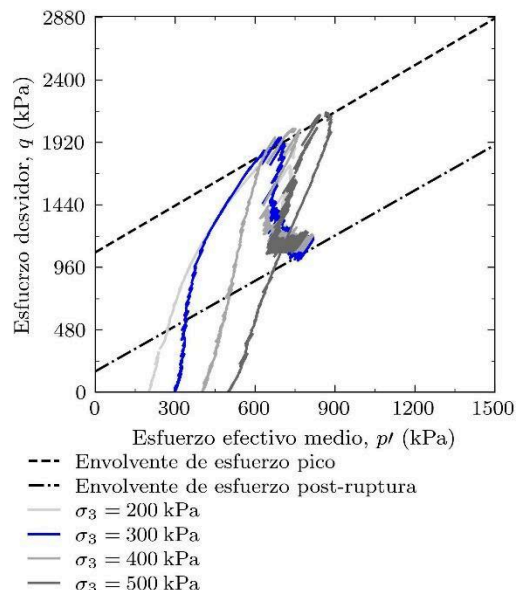


Figura 7. Envolventes de falla y post-ruptura determinadas a partir de los ensayos a distintos niveles de esfuerzo confinante utilizando el sistema de balines.

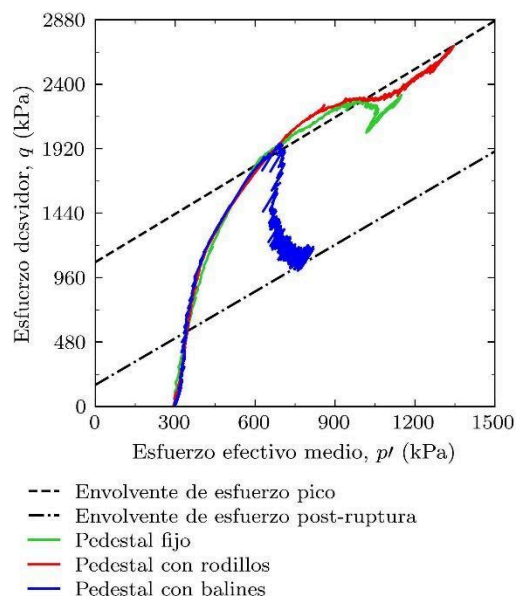


Figura 8. Trayectorias de esfuerzo de los ensayos principales

6 CONCLUSIONES

Los resultados experimentales mostrados en este artículo evidencian la importancia de controlar el proceso de localización para estudiar el comportamiento de los materiales cuasi-frágiles. Estos demuestran que el comportamiento en reblandecimiento posterior a la resistencia pico no depende solo de la respuesta a nivel constitutivo del geomaterial. En realidad, también depende

de las condiciones de contorno impuesta a la muestra y del patrón de localización desarrollado.

El uso de sistemas de desplazamiento que permitan modificar las condiciones de contornos usadas en los ensayos triaxiales convencionales es esencial para estudiar el comportamiento en reblandecimiento de manera objetiva. El sistema utilizado podría ser una alternativa atractiva para calibrar la velocidad de pérdida de resistencia post-ruptura que, como se ha visto, controla la capacidad de carga de problemas de contorno complejos (Mánica et al., 2020). Es posible que muestras con geometrías más simples y con discontinuidades impuestas sean más fácil de reproducir numéricamente y, a su vez, permitan simular de manera más objetiva el proceso de reblandecimiento dentro de las formulaciones regularizadas que en la actualidad son utilizadas para este propósito.

7 REFERENCES

- Alabdullah J. 2010. Testing unsaturated soil for plane strain conditions: A new double-wall biaxial device. Tesis Doctoral. Faculty of Civil Engineering Bauhaus-University Weimar. Alemania.
- Alshibli, K. A., Sture, S., Costes, N. C., Frank, M. L., Lankton, M. R., Batiste, S. N., and Swanson, R. A. 2000. Assessment of localized deformations in sand using x-ray computed tomography. *Geotechnical Testing Journal*, 23, 274–299.
- Burland, J. B. 1990. On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40, 329–378.
- Desrues, J. and Hammad, W. 1989. Shear banding dependency on mean stress level in sand, international workshop. *Numerical Methods for Localization and Bifurcation of Granular Bodies*, Gdansk-Karlsruhe. 25(30), 57-67.
- Desrues, J., Viggiani, G. 2004. Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28, 279-321.
- Fujii Y., Ishijima Y. 2004. Consideration of fracture growth from and inclined slit and inclined initial fracture at the surface of rock and mortar in compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 1035-1041.
- Gao, Z., Li, X., and Lu, D. 2022. Nonlocal regularization of an anisotropic critical state model for sand. *Acta Geotechnica*, 17:427–439
- Gens, A. 2013. On the hydromechanical behavior of argillaceous hard soils-weak rocks. *En Anagnostopoulos, A., Pachakis, M. Tsatsanifos, C. (eds.), Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering -Geotechnics of Hard Soils - Weak Rocks*, 71-118, IOS Press, Athens.
- Gylland, A. S., Jostad, H. P., and Nordal, S. 2014. Experimental study of strain localization in sensitive clays. *Acta Geotechnica*, 9:227–240.
- Head, K. H. 1986. Manual of soil laboratory testing. Vol. 3. London: Pentech Press.
- Mánica, M. A., Ciantia, M. O., and Gens, A. 2020. On the stability of underground caves in calcareous rocks due to long-term weathering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 3885–3901.
- Mánica, M. A., Gens, A., Vaunát, J., and Ruiz, D. F. 2018. Nonlocal plasticity modelling of strain localisation in stiff clays. *Computers and Geotechnics*, 103, 138–150.
- Mesri, G., Shahien, M. 2003. Residual shear strength mobilized in first-time slope failures. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 129: 12-31.
- Mokni M. and Desrues J. 1999. Strain localization measurements in undrained plane strain biaxial tests on Huston RF sand. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 4, 419-441.
- Ni P., Mei G., Zhao Y., Chen H. 2018. Plane strain evaluation of stress paths for supported excavations under lateral loading and unloading. *Soils and Foundations*, 58, 146-159.
- Rechenmacher A. L. 2006. Grain-scale processes governing shear band initiation and evolution in sands. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 54, 22-45.
- Sachan A. and Penumadu D. 2007. Strain localization in soil cylindrical clay specimens using digital image analysis. *Soil and Foundations*, 47 (1), 67-78.
- Sachan A. 2011. Shear testing data of soil: A function of boundary friction in triaxial setup. *Indian Geotechnical Journal*, 41(3), 168-176.
- Skempton, A. W. (1970). The consolidation of clays by gravitational compaction. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 125(1-4), 373–411
- Skempton, A. W. (1954). The pore-pressure coefficients A and B. *Géotechnique*, 4(4), 143-147.
- Viaggiani G., Finno R. J., Harris W. W. 1994. Localisation and Bifurcation. *Theory for Soils and Rocks*. Chambon, Desrues, Vardoulakis (eds). Balkema, Rotterdam, ISBN 9054105119.
- Yao X., Zhang M., Xu G., Yu F. 2018. Development of novel plane strain test apparatus for frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*, 155, 252-262
- Yang S. Q., Jiang Y. Z., Xu W. Y., Chen X. Q. 2008. Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression. *International Journal of Solids and Structures*, 45, 4796-4819.
- Zheng Z., Su G., Jiang Q., Pan P., Huang X., Jiang J. 2022. Mechanical behavior and failure mechanisms of cylindrical and prismatic rock specimens under various confining stresses. *International Journal of Damage Mechanics*, 31(6), 864-881.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.