

ESTUDIO DE LA TENACIDAD A FRACTURA (MODO I) PARA LA MARGA AZUL DEL GUADALQUIVIR

P. Olivares-Rodríguez^{ab*}, M.T. Aranda^a, M. Vázquez-Boza^b, P. Durand^b

^aGrupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, E.T.S. de Ingeniería, Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España

^bDepartamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno, E.T.S. de Arquitectura, Universidad de Sevilla
Av. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España

*Persona de contacto: polivares@us.es

RESUMEN

La Mecánica de la fractura es una disciplina ampliamente desarrollada para un variado rango de materiales utilizados en aplicaciones científicas e ingenieriles. Sin embargo, para el caso de materiales tipo suelo y roca, las herramientas y aplicaciones necesarias para entender los procesos de fractura que pueden desarrollar son actualmente una labor en proceso. Este trabajo supone un primer paso en un futuro proyecto de investigación acerca de la caracterización y modelización del comportamiento a fractura en suelos arcillosos, de la mano de la mecánica de suelos parcialmente saturada y la plasticidad, las cuales tienen una alta influencia en este tipo de materiales. Como objetivo, se estudia el procedimiento para obtener una relación lineal específica entre la tenacidad a la fractura en modo I y la succión para la marga azul del Guadalquivir, en un rango de comportamiento frágil. Para obtener dicha relación, se ha realizado una campaña experimental de ensayos mediante una serie de probetas semicirculares con diferentes succiones sometidas a flexión en tres puntos. En cuanto a los resultados, se obtienen las relaciones de comportamiento para el estudio cualitativo del comportamiento del material, y se hace uso de la regresión lineal para obtener finalmente la relación explícita. Los resultados muestran de forma general que un aumento en la succión influye en un comportamiento más frágil asociado a un incremento de K_{Ic} .

PALABRAS CLAVE: marga azul, succión, probeta semicircular, tenacidad a fractura, mecánica de la fractura

ABSTRACT

Fracture mechanics is a widely developed discipline for a wide range of materials used in scientific and engineering applications. However, in the case of soil and rock-type materials, the tools and applications needed to understand the development of fracture processes are currently a work in progress. Therefore, this work is a first step in a future research project on the characterization and modelling of fracture behavior of clay soils, based on partially saturated soil mechanics and plasticity, which have a high influence on this type of material. For this purpose, the procedure to obtain a linear relationship between the mode I fracture toughness and a range of suction for the Guadalquivir blue marl is studied, specifically for brittle behavior. In order to obtain this relationship, an experimental campaign was carried out using a series of semi-circular specimens with different succions, subjected to the three-point bending test. Regarding the results, the loading curves are obtained for the qualitative study of the behaviour of this material and the linear regression technique is used to finally obtain the desired relationship. The results show in general that an increase in suction influences a more brittle behaviour associated with an increase in K_{Ic} .

KEYWORDS: blue marl, suction, semi-circular bend specimen, fracture toughness, fracture mechanics

Los procesos de fractura son fenómenos inelásticos que ocurren de forma común en materiales utilizados en aplicaciones de ingeniería. Por esta razón, su análisis ha estado enfocado en tareas como el desarrollo de criterios para su prevención en la fase de diseño de estructuras o la modelización del comportamiento de estos materiales en situaciones (estados de carga) que conduzcan al desarrollo de grietas. En el campo de la Ingeniería Civil, los materiales tipo suelo y roca no escapan de sufrir este tipo de procesos mecánicos. Asegurar la seguridad frente a estados límite relacionados con los fenómenos de fractura es esencial en situaciones como la construcción de

estructuras de contención o análisis de excavaciones de túneles. Por tanto, se hace necesario alcanzar un conocimiento profundo acerca de los mecanismos que producen la fractura en suelos y rocas, como por ejemplo el ligado al proceso natural de cambios de humedad en el suelo, que puede afectar a la cimentación de estructuras y será objeto de este trabajo.

Más enfocado al ámbito de este artículo, en el que se realizará un enfoque en suelos arcillosos, estos son materiales geotécnicos de gran importancia debido a su amplia distribución en la corteza terrestre y su uso en aplicacio-



Figura 1: Fotografía del desastre de la rotura de la presa de Aznalcóllar en 1998 (Gerena, Sevilla) [1].

nes específicas, como la construcción de núcleos de presas y diques. En términos generales, el comportamiento mecánico a fractura viene influenciado por numerosos factores, entre los que se encuentran la mineralogía, el contenido de agua en poros, el tamaño de grano, la estructura del suelo y la humedad [2]. Este último factor tiene una gran influencia en la aparición de un rango variado de comportamientos a fractura, y es objetivo de estudio de la mecánica de suelos parcialmente saturados. Por ejemplo, en un proceso de secado, la transición desde un comportamiento dúctil a uno frágil puede observarse a medida que el suelo pierde humedad. Una de las variables primarias en la mecánica de suelos saturados es la succión (Ψ), que se correlaciona con la humedad a través de la curva de retención, que es propia para cada tipología de suelo.

Producto de este comportamiento variable, las estructuras geotécnicas y los materiales parcialmente saturados como las margas pueden presentar roturas rápidas y en algún caso abruptas provocando daños materiales y el cese de las actividades (ejemplo de ello se muestra en la Figura 1 con la rotura de la balsa de Anzalcóllar). Por tanto, merece de importancia el hecho de caracterizar y poder predecir el comportamiento a fractura de geomateriales, con vista a evitar este tipo de desastres [3].

En base a la problemática actual, en este trabajo se propone obtener una relación entre la tenacidad a fractura en modo I (K_{Ic}) y la succión (Ψ) para la marga azul del Guadalquivir, arcilla de naturaleza sobreconsolidada característica de la provincia de Sevilla, con el fin de caracterizar el comportamiento dependiente de la humedad dentro de la mecánica de la fractura. Además, se mostrará la evolución del comportamiento a fractura con la succión, con el objetivo de poder marcar un umbral de comportamiento dúctil-frágil. Todo ello se ha obtenido en base a una metodología de ensayo novedosa dentro de

una campaña experimental.

La organización de este artículo se estructura como sigue: En primer lugar, se describe el material a estudiar, la descripción del método experimental utilizado y el proceso de fabricación de probetas (Sec. 1). Posteriormente se aplica el método de ensayo utilizado para determinar la tenacidad a fractura en modo I (Sec. 2). Finalmente, se muestran y discuten los resultados obtenidos que conducen a las conclusiones extraídas del trabajo realizado (Secs. 3 y 4).

1. MÉTODO EXPERIMENTAL, DISEÑO DE LAS PROBETAS Y PROCESO DE FABRICACIÓN

Una de las principales problemáticas del estudio de la mecánica de la fractura en suelos es que no existen procedimientos estándares o normas específicas que permitan obtener parámetros de fractura en base a un procedimiento experimental. En este caso, en base a estudios para la determinación del parámetro K_{Ic} para otros tipo de arcillas [4–6] se ha optado por seguir un método sugerido por la ISRM para su determinación en rocas, a través del ensayo en flexión de tres puntos utilizando probetas semi-circulares tipo NSCB (“notched semi-circular bend specimen”) [7]. Al ser de aplicación a rocas y con una base puramente de la MFEL (Mecánica de la fractura elástica-lineal), este parámetro de tenacidad a fractura obtenido está limitado a comportamiento frágil, que es el tipo de comportamiento que presentan. Es por ello que el alcance de este trabajo queda limitado a establecer una relación $K_{Ic} - \Psi$ en el rango de comportamiento frágil.

El método sugerido por la ISRM determina el valor de K_{Ic} a partir de la siguiente relación:

$$K_{Ic} = Y' \frac{P_{max} \sqrt{\pi a_0}}{2RB}$$

$$Y' = -1,297 + 9,516 \frac{S}{2R} - \left(0,47 + 16,457 \frac{S}{2R}\right) \frac{a_0}{R} + \left(1,071 + 34,401 \frac{S}{2R}\right) \left(\frac{a_0}{R}\right)^2 \quad (1)$$

Donde Y' es el factor de intensidad de tensiones adimensional (FIT) correspondiente a la geometría de la probeta. La Figura 2 muestra las dimensiones de las muestras NSCB sugeridas por ISRM, donde R es el radio semi-circular de la muestra, B es el espesor, a_0 es la longitud inicial de la grieta, S es la distancia entre los puntos de apoyo, d es el diámetro de los rodillos utilizados como apoyos y P_{max} corresponde a la carga máxima alcanzada en el ensayo de flexión en tres puntos. Los autores de [7] también recomiendan un rango de valores para dichos parámetros, en base a los modelos con los que se ha obtenido la relación anterior. Tanto estas especificaciones como los valores de los parámetros finalmente empleados se recogen en la Tabla 1.

Parámetro	Recomendación	Valor empleado
Radio (R)	Mayor de 10x tamaño de grano o 38 mm	27.5 mm
Espesor (B)	Mayor de 0.2R o 30 mm	25 mm
Longitud de entalla (a_0)	$0,4 \leq a_0/R \leq 0,6$	15 mm
Distancia entre apoyos inferiores (S)	$0,5 \leq S/2R \leq 0,8$	35 mm
Diámetro de rodillos (d)	Mayor de 5 mm o R/40	5 mm

Tabla 1: Determinación de los parámetros geométricos de la probeta NSCB.

Con el objetivo de establecer una ley para la marga azul del Guadalquivir en condiciones naturales, es necesario caracterizar el material a utilizar en la campaña de experimentación para que los resultados obtenidos puedan corresponderse a una distribución lo más homogénea posible. Dicho material ha sido seleccionado conforme a la caracterización recogida en [8] y a ensayos básicos en suelos [9], estableciendo un valor en torno al 50 % para el límite líquido, 30 % para el índice de plasticidad y 30 % de contenido en peso de $CaCO_3$. El material utilizado en la campaña experimental ha sido obtenido de sondeos custodiados en portatestigos realizados en la demarcación de Sevilla.

Por otro lado, el proceso de fabricación de las probetas hace necesario plantear una metodología novedosa al trabajar con suelo inalterado. En primer lugar, se obtienen discos con un espesor de 25 mm más una cierta holgura para su posterior refrentado. Estos discos se cortan por la mitad para obtener las probetas tipo SCB (“semi-circular

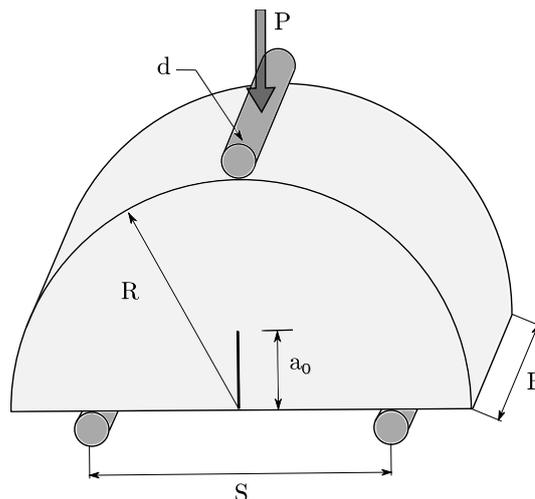


Figura 2: Geometría de las probetas NSCB y configuración de carga.

bend specimen”). Para inducir un valor de succión determinado, es necesario someter a las probetas a un ciclo de secado mediante la técnica de equilibrio de vapor [8]. Dicha técnica consiste en mantener las muestras en presencia de una atmósfera a una determinada humedad relativa creada por una disolución (según la succión que se requiera, las proporciones del soluto y disolvente vienen determinadas por [10] para disoluciones ácidas) un cierto tiempo hasta que se alcance el equilibrio de succión. Una vez pasado ese período se puede proceder a realizar la entalla a las muestras mediante una máquina de corte.

2. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Para determinar la relación $K_{Ic} - \Psi$ se propone una campaña de ensayos para un cierto número de probetas NSCB agrupadas por ciertos valores de succión, impuestas mediante la metodología explicada anteriormente. Los valores de succión elegidos y el número de probetas ensayadas vienen recogidos en la Tabla 2.

Ψ (MPa)	Nº probetas NSCB ensayadas
26.5	12
40.1	11
50	8
100	6

Tabla 2: Relación de succiones y número de probetas ensayadas.

En cuanto a la campaña de ensayos de flexión en tres puntos se utilizó un sistema de ensayo INSTRON 4482 con una célula de carga de 5 kN bajo condiciones de control en desplazamientos, siendo la velocidad de carga de 0,20 mm/min para asumir un estado cuasi-estático para su aplicación. El presente programa experimental se ejecutó

en una sala de ambiente controlado a 25 °C y humedad en torno al 50 %.

En lo que concierne al criterio de validez del ensayo, se establece como resultado inválido aquel en el que el plano de la grieta de la probeta se desvíe más de 0.05D [7], en este caso 2.25 mm. Para evitarlo, resulta esencial asegurar la alineación del plano de la entalla con el de la dirección de la carga. En la Figura 3 se puede apreciar el tipo de rotura de las probetas ensayadas, cumpliendo la mayoría de ellas con el criterio establecido.



Figura 3: Vista general de las probetas NSCB ensayadas tras su rotura.

Por último, con vista a comprobar la succión de cada probeta NSCB en el momento del ensayo, se ha procedido a su medida tras la rotura mediante la técnica de papel de filtro [11] mediante el procedimiento recogido en [8].

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como resultado directo de la realización del ensayo a flexión de tres puntos, en la Figura 4 se pueden observar las gráficas Fuerza-Desplazamiento asociados al punto de aplicación de la carga vertical para cada succión estudiada. A priori, se puede comprobar que la distribución de curvas guarda una cierta dispersión, al ser un material de ensayo que no es fabricado. Sin embargo, de forma cualitativa sí se puede observar un patrón de comportamiento, en cuanto a la forma de la curva se refiere.

Con el objetivo de obtener una relación $P_{max} - \Psi$, para luego traducirla a $K_{Ic} - \Psi$ aplicando (1), de cada distribución de curvas se puede obtener un valor medio de la carga máxima obtenida del ensayo, denominada $\overline{P_{max}}(\Psi)$. El objetivo del cálculo de valores medios es comprobar si dicho valor puede ser representativo de cada distribución. Para ello, los valores medios pueden ser comparados con la mediana del conjunto $Me(P_{max})(\Psi)$, obteniéndose los resultados en la Tabla 3.

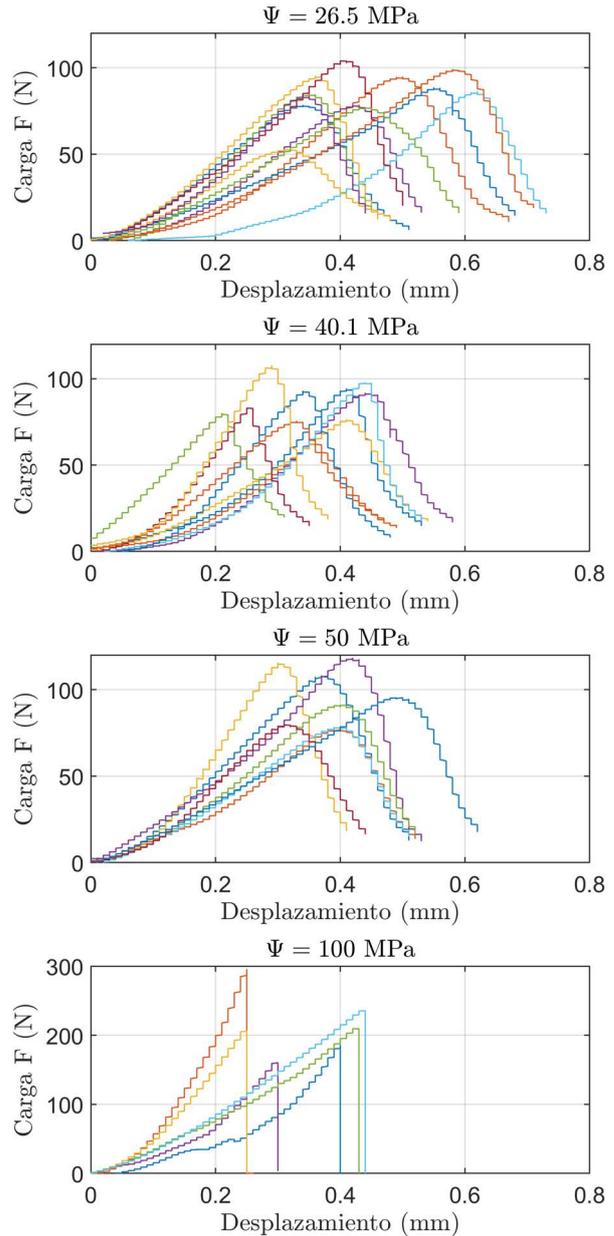


Figura 4: Diagramas Carga-Desplazamiento para las succiones estudiadas.

Ψ (MPa)	$\overline{P_{max}}$ (N)	$Me(P_{max})$ (N)	E.R. (%)
26.5	85.097	85.460	0.43
40.1	86.128	87.368	1.44
50	95.352	93.0969	2.37
100	215.460	208.120	3.41

Tabla 3: Comparativa de $\overline{P_{max}}$ y $Me(P_{max})$ (el error relativo se calcula con respecto al valor de la media).

Observando dichos resultados, se puede comprobar como en todos los casos el error relativo se encuentra por debajo del 4 %. Ello es indicativo de que las distribuciones son notablemente homogéneas, por lo que se puede

adoptar el valor de la media o de la mediana del conjunto como representativo. Un incremento del error relativo puede tener diversos orígenes, como la naturaleza distinta del material ensayado dentro de un mismo conjunto, la presencia de ciertos granos heterogéneos dentro del material que modifiquen la rigidez de la muestra ensayada o un fallo de aplicación de la metodología del ensayo.

Utilizando los valores medios como representativos para cada succión, se puede obtener una recta de regresión mediante un ajuste por mínimos cuadrados. Dicho ajuste es representado en la Figura 5. La ecuación de esta recta puede tomarse como la relación $P_{max} - \Psi$, que tiene la expresión:

$$P_{max} = 1,9213\Psi + 16,4729 \quad (2)$$

Siendo Ψ aplicada en (MPa) para obtener P_{max} en (N). El estadístico R^2 , que ofrece una idea de cuán bien se ajusta la serie de datos a una ley lineal, toma un valor aproximado de 0,94, dando buena confianza del ajuste lineal para el rango de succiones estudiado.

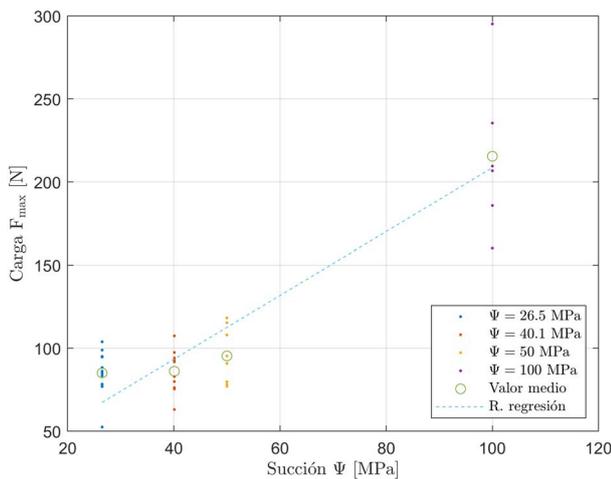


Figura 5: P_{max} vs. Ψ y ajuste lineal realizado.

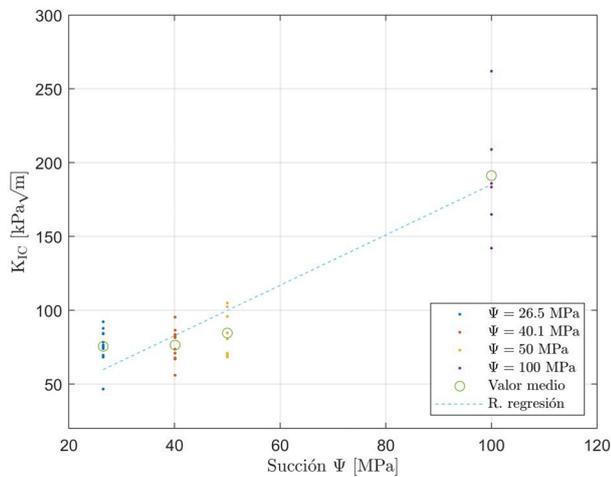


Figura 6: K_{Ic} vs. Ψ y ajuste lineal realizado.

Para obtener la relación $K_{Ic} - \Psi$, tal y como se ha tratado anteriormente, aplicamos la ec. (1) a la serie de valores P_{max} . En la Figura 6 se puede observar la regresión lineal efectuada a los valores representativos de K_{Ic} obtenidos. La expresión en este caso queda:

$$K_{Ic} = 1,7052\Psi + 14,6254 \quad (3)$$

Siendo Ψ aplicada en (MPa) para obtener K_{Ic} en ($KPa \sqrt{m}$). Al ser la ec. (3) obtenida a través de la aplicación lineal de (1) en la ec. (2), el estadístico R^2 mantiene su valor.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha mostrado el procedimiento de obtención de una relación lineal entre la tenacidad a fractura en modo I y la succión específica para la marga azul del Guadalquivir. Dicha relación es aplicable en un rango de comportamiento frágil, debido a la naturaleza de la formulación empleada.

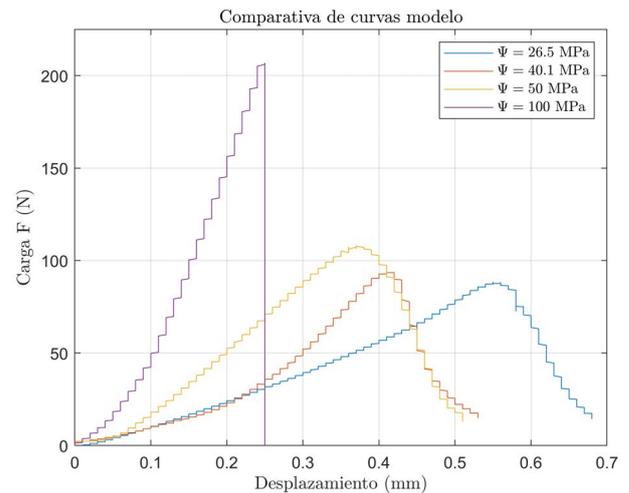


Figura 7: Comparación de los diagramas Carga-Desplazamiento para las curvas representativas de cada succión.

Para obtener dicha relación se ha realizado una campaña experimental de ensayos en base a un método recomendado por la ISRM [7], donde se han agrupado las probetas por valores de succión impuestos. La evolución del comportamiento de dichas probetas a medida que crece la succión (disminuye la humedad) puede visualizarse en la Figura 7. De forma cualitativa, a través de curvas representativas para cada succión, puede observarse como a medida que crece la succión: (i) la carga máxima y la rigidez del material aumentan, (ii) el desplazamiento máximo disminuye y (iii) la caída, una vez alcanzada la carga máxima, es más abrupta. Estos hechos son síntomas de que un aumento de la succión influye en un comportamiento más frágil de la probeta, con un crecimiento asociado de K_{Ic} como puede resultar lógico a priori (sin tener

en cuenta otros efectos como la retracción, que es objeto de succiones más altas que las estudiadas en este trabajo).

Por tanto, la relación $K_{Ic} - \Psi$ es aplicable en primera aproximación al rango de succiones estudiado, siendo menos segura para la succiones más bajas, que presentan mayor comportamiento dúctil asociado al desarrollo de deformaciones plásticas. Para refutar este hecho se haría necesario el estudio de otras succiones, para evidenciar y caracterizar el comportamiento plástico de la marga.

En cuanto a comparaciones con otros autores [4, 5], al trabajar en un rango de humedad diferente y con un suelo distinto, resulta difícil ofrecer un contraste de los resultados obtenidos. A pesar de ello, dichos autores también llegan a la conclusión de que K_{Ic} crece de cierta manera (lineal o exponencial en algunos casos) cuando la succión aumenta. De todos modos, la baja dispersión obtenida en los resultados y el alto valor del estadístico R^2 denotan la fiabilidad de la relación obtenida, teniendo siempre en cuenta que el suelo de carácter inalterado muestra una fuerte naturaleza heterogénea.

Finalmente, con vista a trabajos futuros, se propone mejorar los coeficientes de la relación obtenida a partir del estudio de succiones más altas a partir de 100 MPa, donde se espera un comportamiento frágil. Por otro lado, también podría resultar interesante e innovador la formalización de una formulación más completa para la obtención de la relación $K_{Ic} - \Psi$ para comportamiento dúctil, acoplado el comportamiento altamente plástico de las arcillas para succiones bajas.

AGRADECIMIENTOS

POR, MVB y PD agradecen su apoyo al Ministerio de Ciencia e Innovación y a la Agencia Estatal de Investigación a través de la subvención del proyecto PID2019-109723GB-I00. Además, POR agradece el apoyo de la Universidad de Sevilla a través del contrato predoctoral otorgado en la convocatoria VIPPIT-2020-II.2. Por último, los autores agradecen expresamente su trabajo dentro del proyecto anteriormente citado a Dña. Rosa María Maza Palop y a D. José Antonio Reinoso Cuevas.

REFERENCIAS

- [1] Luis I. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, and C. Oteo. Ingeniería Geológica. *Pearson Educación, Madrid*, 2002.
- [2] J. J. Xu et al. Investigation on desiccation cracking behavior of clayey soils with a perspective of fracture mechanics: a review. *Journal of Soils and Sediments* 22, 859–888, 2022.
- [3] T. Szwedzicki. Rock mass behaviour prior to failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(4):573–584, 2003.
- [4] J. Wang, S. Huang, W. Guo, Z. Qiu, and K. Kang. Experimental study on fracture toughness of a compacted clay using semi-circular bend specimen. *Engineering Fracture Mechanics*, 224:106814, 2020.
- [5] M.R. Lakshmikantha, Pere C. Prat, and Alberto Ledesma. Experimental evidence of size effect in soil cracking. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(3):264–284, 2012.
- [6] O.B. Aluko and H.W. Chandler. A fracture strength parameter for brittle agricultural soils. *Biosystems Engineering*, 93(2):245–252, 2006.
- [7] M. Kuruppu, Y. Obara, M.R. Ayatollahi, K. Chong, and T. Funatsu. ISRM-Suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47:267–274, 12 2013.
- [8] M. Vázquez-Boza. Comportamiento volumétrico de la marga azul del Guadalquivir ante los cambios de succión. *Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla*, 2014.
- [9] UNE-EN ISO 17892. Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio en suelos. *Asociación Española de Normalización*, 2022.
- [10] J.I. Gmitro and T. Vermeulen. Vapor-liquid equilibria for aqueous sulfuric acid. *AIChE Journal*, 10(5):740–746, 1964.
- [11] ASTM D5298-16. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. *Annual Book of ASTM Standards*, (vol. 04.08), 2016.