



# El laberinto invisible bajo nuestros pies: La Física detrás de la ley de Darcy

J. MORALES<sup>1\*</sup>, M. MOSQUERA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Ap-Postal 14-0149, Lima 14, Perú.

\* Email: jeorgeth.morales@unmsm.edu.pe



## Introducción

Bajo la superficie, el suelo no es sólido, sino una compleja red de vacíos interconectados. [1] Los suelos, acorde a la mecánica de suelos y geotecnia, pueden ser clasificados según tres propiedades físicas: granulometría [1], morfología [2] y plasticidad [3]. Así logramos clasificarlos en dos grandes grupos, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS): suelos de grano grueso y suelos de grano fino [4].

### Suelos de grano grueso

Se definen físicamente por retener más del 50% de sus partículas en el Tamiz N° 200 (>0.075 mm). Forman un esqueleto rígido con macroporos interconectados donde predominan las fuerzas gravitacionales y la fricción mecánica. Esta geometría permite un flujo libre y laminar, siendo el escenario ideal para la aplicación directa de la Ley de Darcy con altas permeabilidades (K). [1]

### Suelos de grano fino

Se caracterizan porque más del 50% del material pasa el Tamiz N° 200. En estos suelos (limos y arcillas), la morfología laminar y la alta superficie específica generan fuerzas electroquímicas que dominan sobre la gravedad. Esta interacción atrapa el agua (doble capa difusa) y genera plasticidad, reduciendo drásticamente la porosidad eficaz y la conductividad hidráulica. [1]

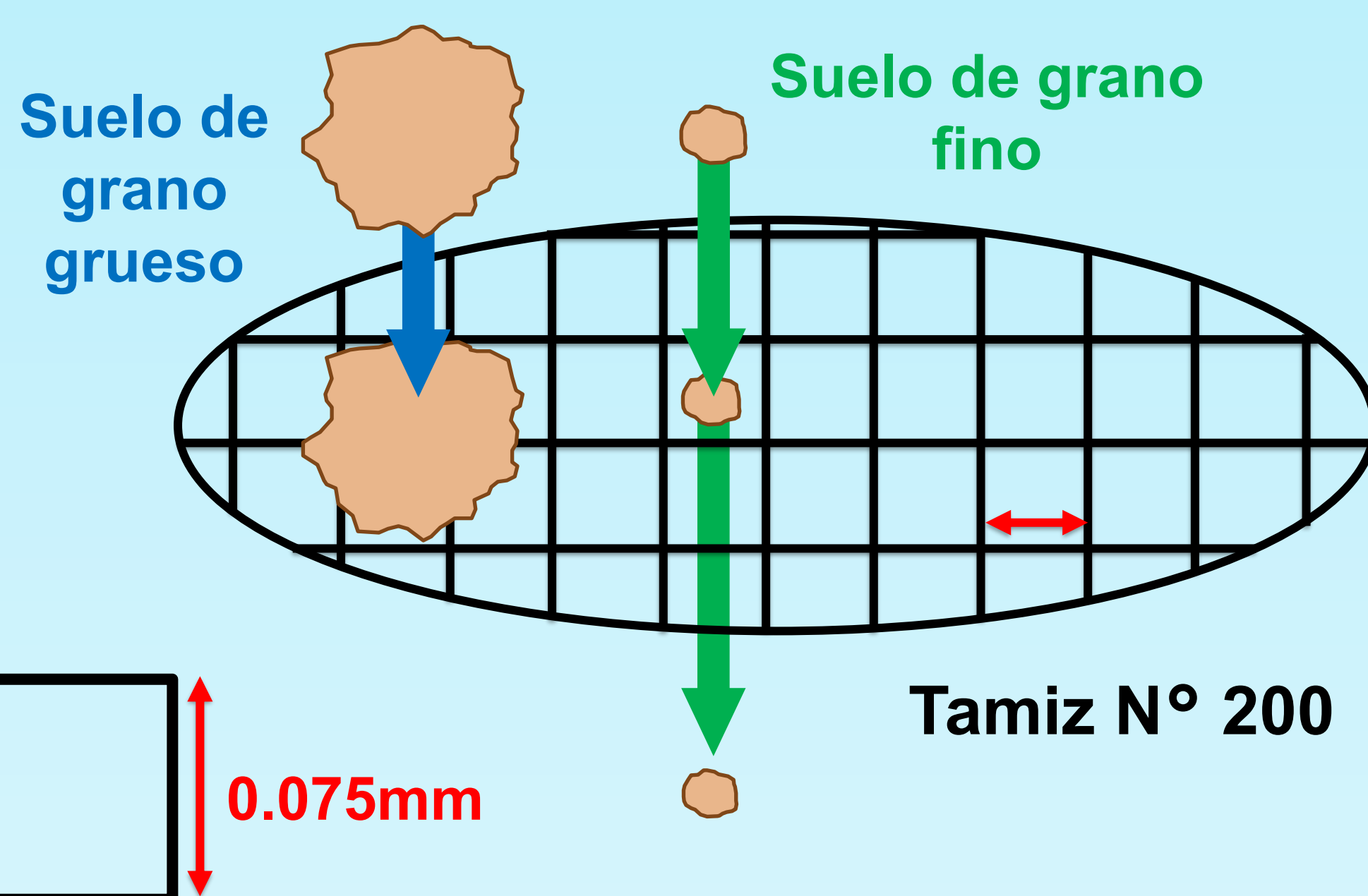


Fig 1. Representación esquemática del Tamiz N° 200 como frontera granulométrica (0.075mm). Se ilustra la discriminación mecánica entre el esqueleto rígido de los suelos gruesos (retenidos) y la fracción de suelos finos (pasantes).

## Resumen

Aunque el 'laberinto' poroso impone una resistencia geométrica fija —cuantificada como permeabilidad intrínseca ( $k$ )—, la velocidad final del flujo está gobernada por la interacción dinámica entre este esqueleto sólido y el fluido. El Coeficiente de Permeabilidad se define físicamente como  $K = k \left( \frac{\rho g}{\mu} \right)$ , demostrando que la conductividad no es una constante simple, sino una propiedad compuesta. Mientras que  $k$  describe la tortuosidad y el tamaño de los vacíos del suelo, el término del fluido revela una dependencia termodinámica crítica: experimentalmente, un incremento en la temperatura reduce la viscosidad dinámica ( $\mu$ ) al debilitar las fuerzas de cohesión molecular. Esto permite que el agua transite el mismo laberinto con mayor facilidad y velocidad.

## Conclusiones

El análisis del Coeficiente de Permeabilidad (K), al descomponerlo en la resistencia geométrica del laberinto ( $k$ ) y las propiedades dinámicas del fluido ( $\mu$ ), demuestra su implicación crítica en diversas áreas de la ingeniería:

✓ **Diseño de Filtros y Drenajes:** La selección de suelos con alta redondez y baja angulosidad (morfología) es crucial para maximizar  $k$  y asegurar la estabilidad de estructuras mediante la eficiencia del drenaje.

## Esquemas representativos

### • CARTILLA DE KRUMBEIN Y SLOSS

#### Influencia de la Morfología en el Flujo:

La idealización del suelo como esferas perfectas es insuficiente para describir la física del laberinto poroso. Mediante la *Cartilla de Krumbein & Sloss*, se cuantifica la desviación de la forma ideal a través de la **esfericidad** y la **redondez**. Físicamente, una mayor angulosidad en los granos incrementa la superficie específica y la fricción mecánica, generando un empaquetamiento más denso y tortuoso que reduce drásticamente la permeabilidad intrínseca ( $k$ ), incluso si el tamaño de grano es el mismo. [5]

#### Esfericidad

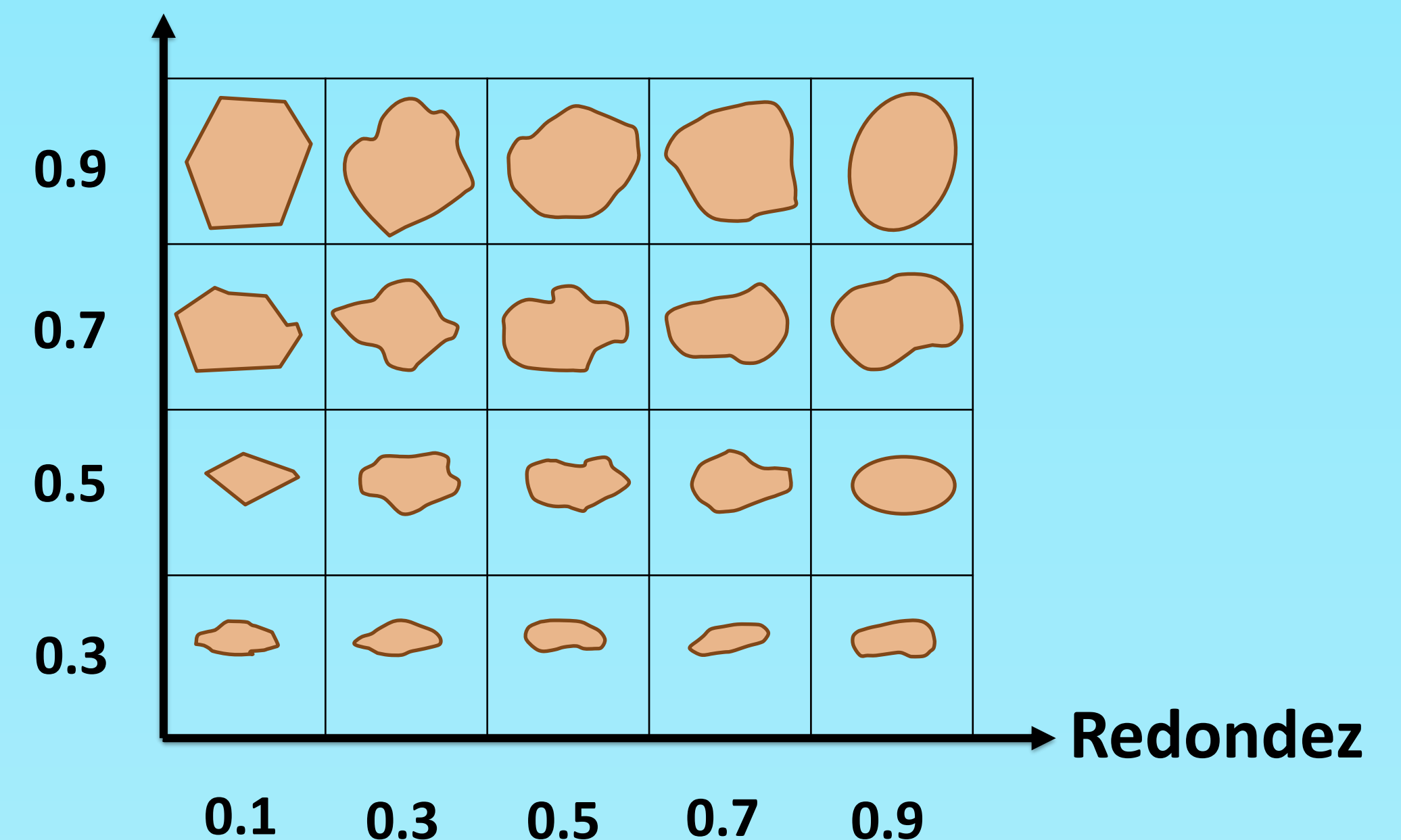


Fig 2. Carta de Krumbein & Sloss. Estándar visual para estimar la morfología del grano (Redondez y Esfericidad) y su impacto en la fricción. [Krumbein & Sloss, 1963].

### • TORTUOSIDAD ( $\tau$ )

La tortuosidad ( $\tau$ ) cuantifica matemáticamente la complejidad del 'laberinto'. Se define como la relación entre la trayectoria real sinuosa del fluido ( $L_e$ ) y la longitud macroscópica de la muestra ( $L$ ). Mientras que los suelos granulares (retenidos en el Tamiz N° 200) presentan macroporos que permiten flujos casi directos, la morfología laminar de los suelos finos obliga al agua a rodear múltiples obstáculos microscópicos. Este incremento en la longitud de recorrido maximiza la fricción viscosa intra-poros, resultando en una disipación de energía que justifica la bajísima permeabilidad observada en arcillas. [2]

$$\tau = \frac{L_e}{L}$$

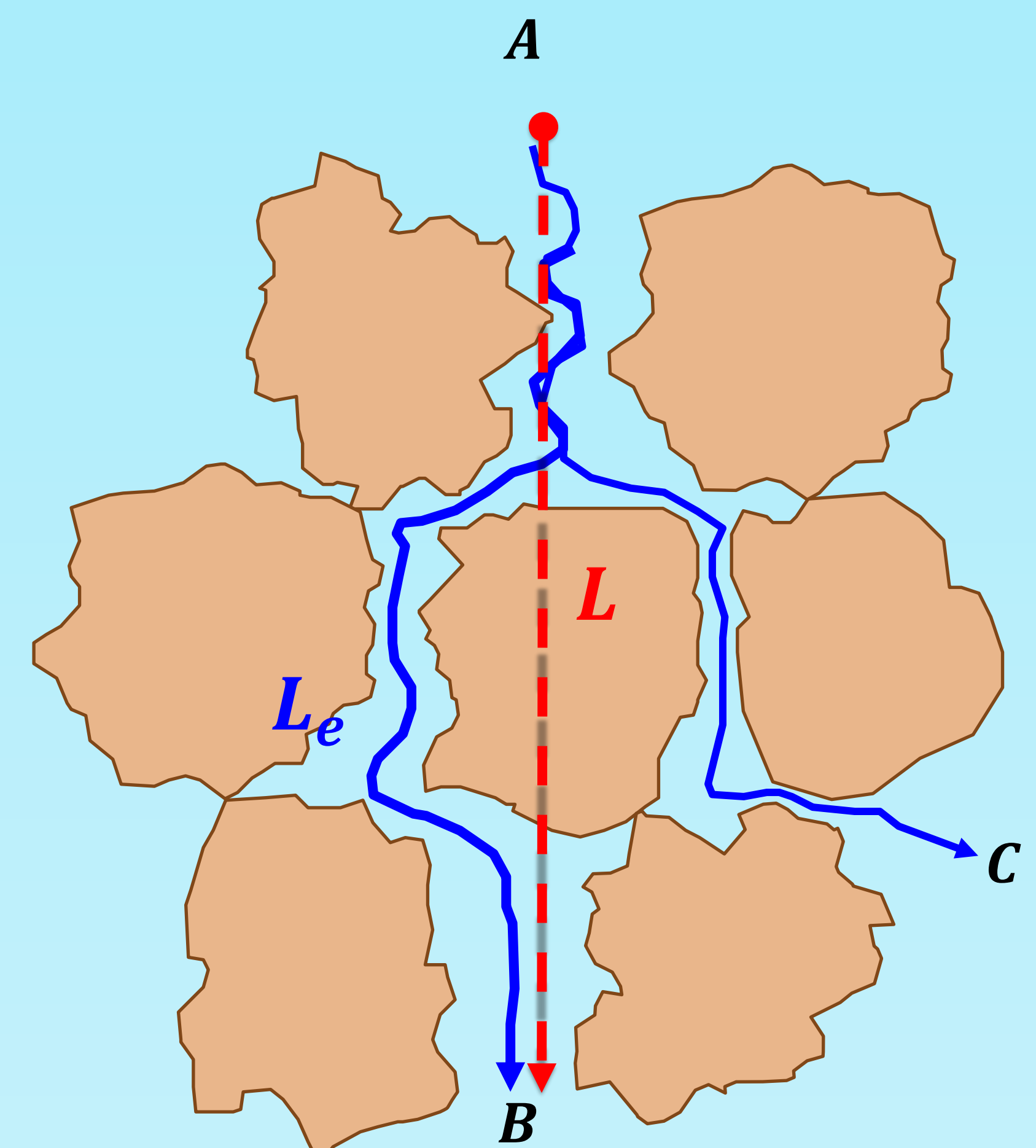


Fig. 3. Concepto de Tortuosidad ( $\tau$ ) en el medio poroso. La trayectoria efectiva del fluido ( $L_e$ ) es mayor a la longitud macroscópica de la muestra ( $L$ ), incrementando la disipación de energía viscosa y reduciendo la conductividad hidráulica.

### • COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE DARCY (K):

La Ley de Darcy establece que la velocidad de flujo ( $v$ ) en el medio poroso es directamente proporcional a la conductividad hidráulica ( $K$ ) y al gradiente de carga hidráulica ( $i$ ). [2] El reto de la Mecánica de Fluidos reside en desglosar el coeficiente  $K$ . Físicamente,  $K$  no es una constante exclusiva del suelo, sino una propiedad compuesta que resulta de la interacción entre el Medio Poroso (geometría del laberinto) y el Fluido (viscosidad). [1] Esta relación se expresa como:

$$K = k \left( \frac{\rho g}{\mu} \right)$$

Fig. 4. Desglose físico del Coeficiente de Permeabilidad (K). La ecuación diferencia la influencia de la geometría del medio ( $k$ ) frente a las propiedades dinámicas del fluido ( $\rho, \mu$ ), subrayando la dependencia de la viscosidad respecto a la temperatura.

Donde  $k$  (Permeabilidad Intrínseca) representa la resistencia geométrica del laberinto (el suelo), y el término  $\left( \frac{\rho g}{\mu} \right)$  introduce la dependencia termodinámica del fluido. La reducción de la viscosidad dinámica ( $\mu$ ), por ejemplo por incremento de temperatura, explica experimentalmente una mayor velocidad de flujo al transitar el mismo laberinto [2].

## Referencias

- [1] Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). Principles of Geotechnical Engineering (9.ª ed.). Cengage Learning
- [2] Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of soil behavior (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [3] Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). Mecánica de suelos: Tomo 1 - Fundamentos de la mecánica de suelos (3a. ed.). Limusa.
- [4] ASTM International. (2017). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System) (ASTM D2487-17). ASTM International.
- [5] Cho, G. C., Dodds, J., & Santamarina, J. C. (2006). Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(5), 591-602