



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

J. MORALES^{1*}, M. MOSQUERA¹¹Facultad 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]

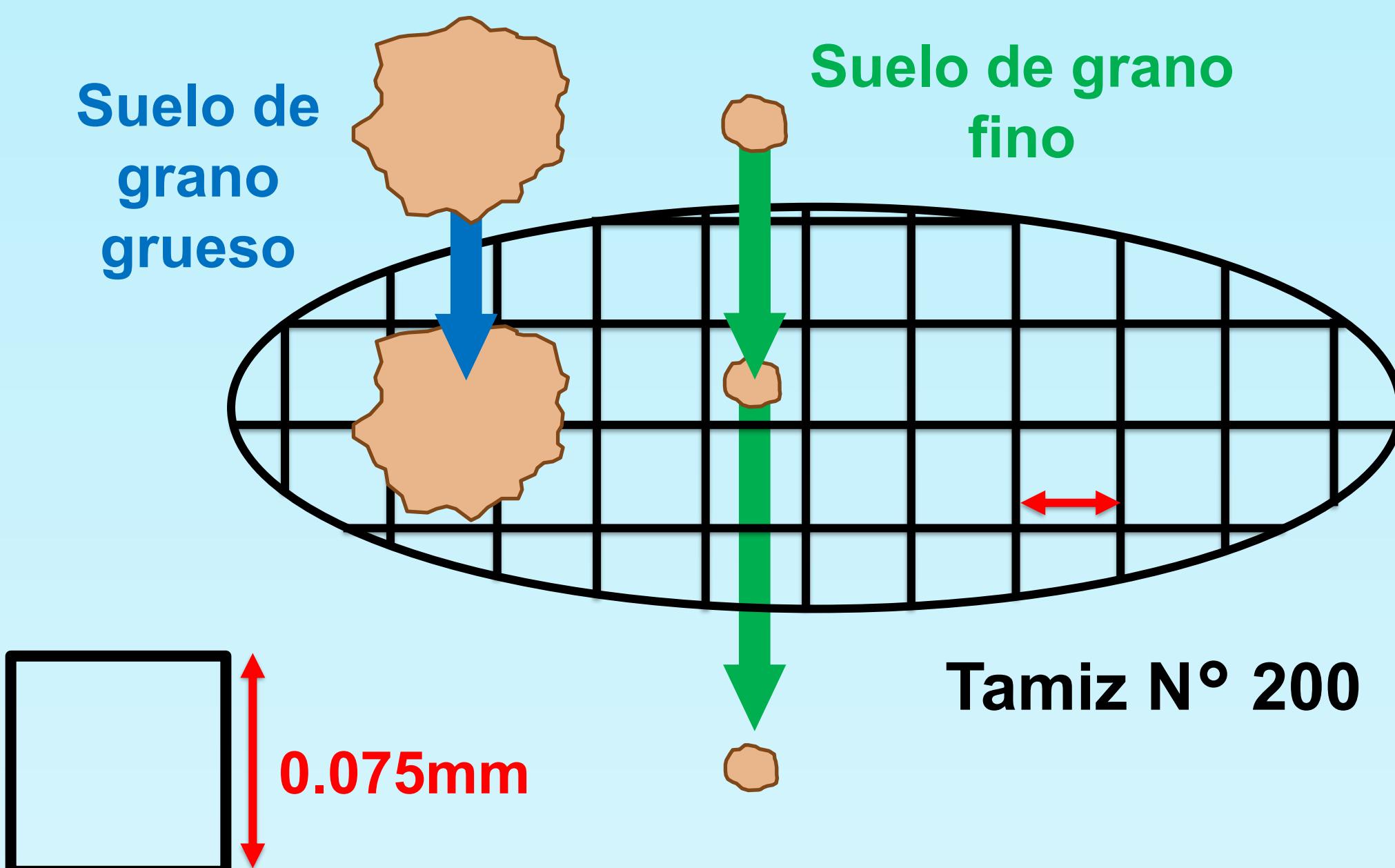


Fig. 1. Representación esquemática del Tamiz N° 200 como frontera granulométrica (0.075mm). Se ilustra la discriminación mecánica entre el esqueleto rígido de los suelos gruesos (retenidos) y la fracción de suelos finos (pasantes).

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 (μ) 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 (μ), 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

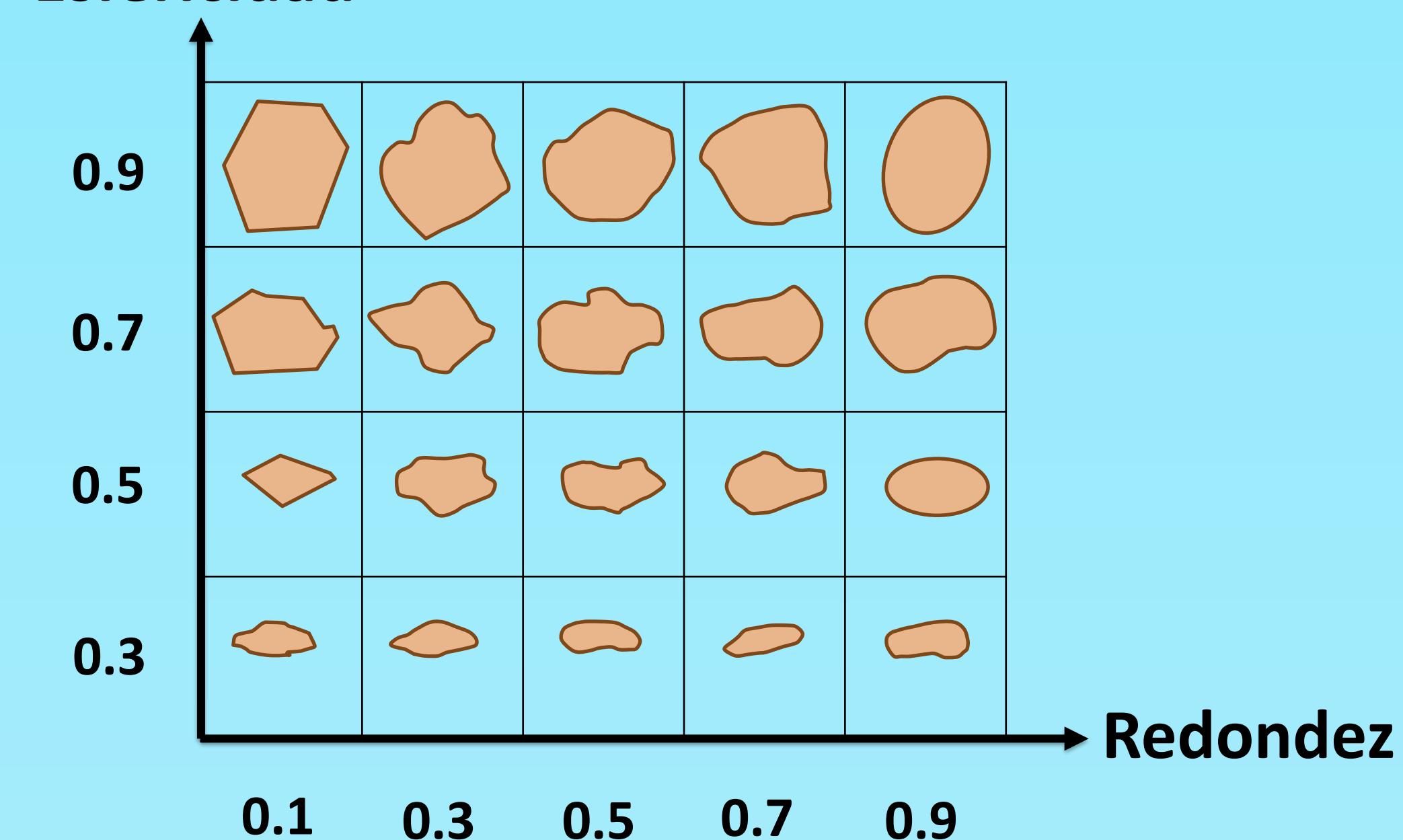


Fig. 2. Carta de Krumbein & Sloss. Estándar visual para estimar la morfología del grano (Redondez y Esfericidad) y su impacto en la fricción. [Krumbein & Sloss, 1963].

• TORTUOSIDAD (τ)

La tortuosidad (τ) 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]

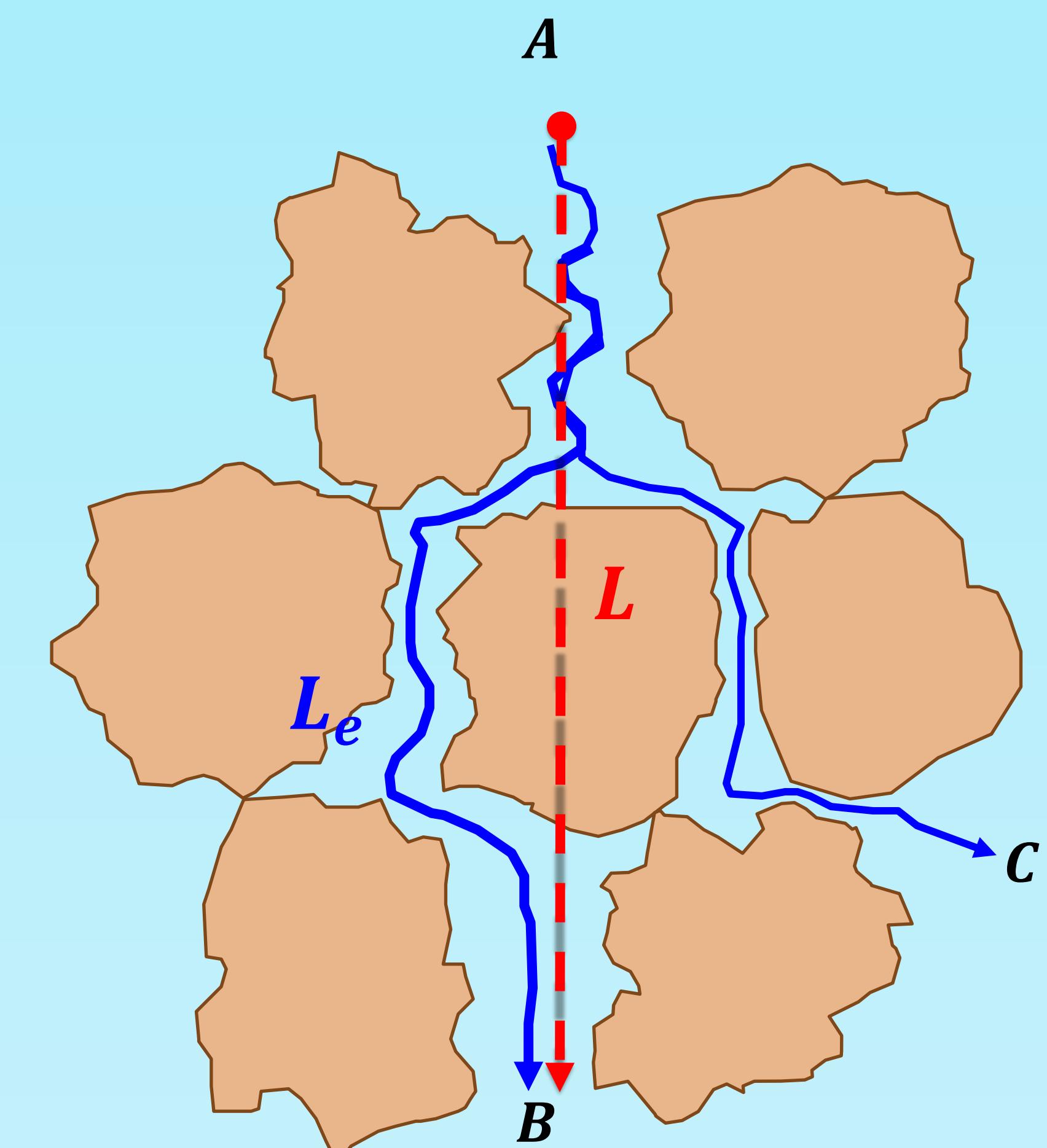


Fig. 3. Concepto de Tortuosidad (τ) en el medio poroso. La trayectoria efectiva del fluido (L_e) es mayor a la longitud macroscópica de la muestra (L), incrementando la disipación de energía viscosa y reduciendo la conductividad hidráulica.

• 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 (ρ, μ), 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 (μ), 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.