

CLASIFICACIÓN DE SUELOS: FUNDAMENTO FÍSICO, PRÁCTICAS ACTUALES Y RECOMENDACIONES

J. Carlos Santamarina¹ y Guillermo A. Narsilio²

1. Georgia Institute of Technology. Atlanta, GA. 30332. USA
2. The University of Melbourne, Melbourne, VIC. 3010. Australia

RESUMEN

La relevancia del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM D 2487) se torna evidente cuando se analiza desde la perspectiva del comportamiento fundamental de los materiales granulares. Este análisis también permite identificar parámetros importantes en el comportamiento de los suelos que no son adecuadamente considerados en la rutina del laboratorio geotécnico. Entre ellos se incluyen la superficie específica y las cargas eléctricas, la forma de las partículas, el grado de saturación, la rigidez cortante a baja deformación, la variabilidad espacial, la relación de vacíos de campo y los parámetros del estado crítico. Este documento presenta una discusión sucinta de estos parámetros y la descripción detallada de nuevas técnicas sencillas y accesibles que facilitan la cuantificación eficaz de los mismos.

ABSTRACT

The relevance of the Unified Soil Classification System (USCS) becomes evident when it is analyzed taking into consideration the particulate nature of soils. Furthermore, a fundamental analysis helps identify important soil parameters that are not adequately considered in routine geotechnical laboratory practice. These parameters include: specific surface and surface charge, particle shape, saturation, small-strain shear stiffness, spatial variability, in-situ void ratio and critical state soil parameters. This manuscript includes a brief discussion of these parameters and a detailed description of simple yet effective procedures that can be used for their quantification.

palabras clave: clasificación de suelos, ensayos de laboratorio, superficie específica, variabilidad, bender elements, estado crítico, forma de las partículas.

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento de los suelos es complejo debido a la naturaleza granular y a la coexistencia de partículas sólidas con fluido intersticial que generalmente está compuesto por más de un fluido (agua, sales, contaminantes orgánicos e inorgánicos, gases como ser aire o metano, etc.). El entendimiento actual del comportamiento de los suelos ha evolucionado a través del siglo XX, incluyendo esfuerzos efectivos (Terzaghi en los años '20), coloides y arcillas (Goy, Chapman en los '10, Lambe y Mitchell en los '50), dilatación en corte (Taylor 1948 y Estado Crítico con Roscoe, Schofield y Wroth en los '60), fase fluida mixta y suelos no saturados (Bishop, Aitchinson, Fredlund y Morgenstern en los '60). Una nueva etapa se anticipa actualmente con el estudio de la geo-química mediada por microorganismos (ver Figura 1).

Las distintas clasificaciones de suelos intentan capturar y describir este complejo material en vista a aplicaciones específicas, con sus correspondientes necesidades: construcción de caminos y pavimentos, agricultura, minería o geomecánica. Las diferentes clasificaciones incluyen: 1) el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS, 2) el sistema de la American Association of State Highway & Transportation Officials AASHTO, 3) el método propuesto por la Federal Aviation Administration FAA, 4) el sistema de US Department of Agriculture USDA, y 5) la taxonomía del Eurocódigo, entre otros.

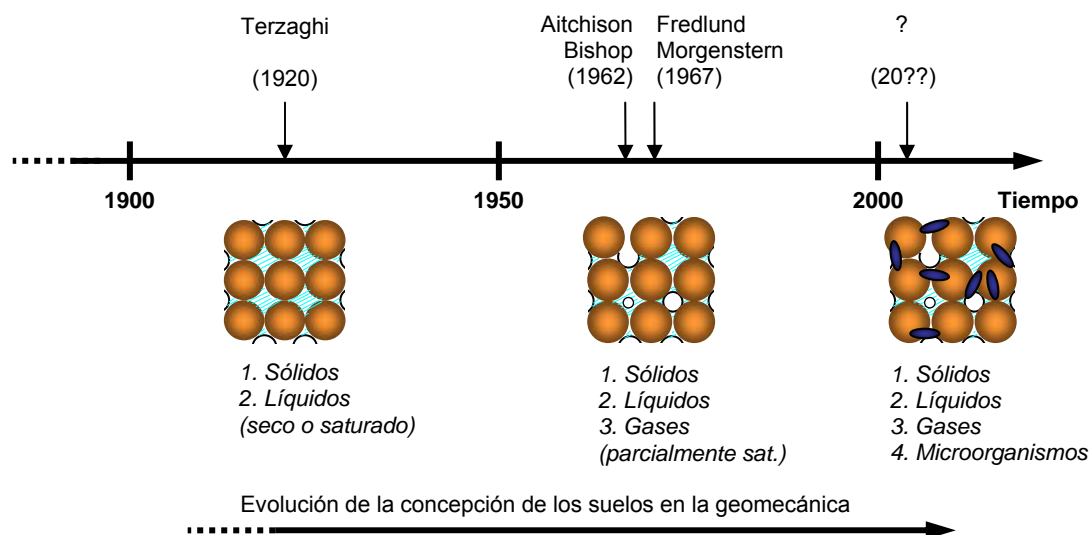


Figura 1: El comportamiento geo-mecánico es afectado por la interacción entre las diferentes fases en el suelo: partículas sólidas, líquidos (con sales hidratadas), gases y microorganismos.

El sistema de la AASHTO (AASHTO M 145-82) fue originalmente desarrollado en los años '20. Está basado en características de estabilidad de los suelos empleados en la construcción de caminos. Se fundamenta en distribución granulométrica, límite líquido y límite plástico. Los tamices estándar #10, #40 y #200 (aberturas de 2 mm; 0,42 mm y 0,075mm respectivamente) son de vital importancia. El procedimiento del Departamento de Agricultura de EEUU (USDA por sus siglas en inglés) clasifica los suelos por la granulometría en un triángulo de textura considerando el contenido de arena, limo y arcilla. Al igual que la USDA, la clasificación propuesta por la Federal Aviation Administration (FAA) no contempla a las gravas en forma directa. El Eurocódigo 7, orientado al diseño geotécnico, propone una clasificación basada en los siguientes ensayos: contenido de humedad y densidad, densidad de partículas, análisis granulométrico, límites de Atterberg, ensayo de índice de densidad para materiales granulares, dispersibilidad del suelo y susceptibilidad a congelamiento.

El análisis detallado del SUCS en base al comportamiento fundamental de los suelos se presenta en la próxima sección, seguida por la identificación de parámetros importantes que requieren caracterización apropiada.

2. ANÁLISIS FUNDAMENTAL DEL SISTEMA UNIFICADO

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS (ASTM D 2487 y 2488) es el de uso más extendido en la práctica geotécnica. Fue inicialmente propuesto por Arthur Casagrande en 1932, tentativamente adoptado por el Departamento de ingeniería de los EEUU en 1942 y definitivamente presentado a la ASCE en 1948 (Casagrande 1932, 1948). La U.S. Army Corps of Engineers comenzó a emplearla en 1953 en tanto que la U.S. Bureau of Reclamation lo hizo en 1974. Está basado en el análisis granulométrico y en los límites de Atterberg (límites líquido y plástico) de los suelos.

La primera y más importante decisión esta dada por el contenido de finos, definido como el correspondiente a partículas de diámetro equivalente menor a 0,075 mm, pasante del tamiz #200. Si menos del 50% en peso del suelo pasa el tamiz #200, entonces el suelo es “grueso” y se subclasifica en arena o grava usando el tamiz #4. De otro modo, el suelo es “fino” y se subclasifica en limo o arcilla, usando los límites de plasticidad. La Figura 2 presenta un esquema simplificado del SUCS. La importancia del tamiz #200 se hace evidente cuando se analizan las fuerzas que actúan entre las partículas, incluyendo las de peso propio, las fuerzas debidas a los esfuerzos efectivos, fuerzas eléctricas, y fuerzas capilares. La Figura 2 (parte superior) muestra la correlación existente entre el tamaño equivalente de las partículas y la naturaleza de las fuerzas gobernantes: los tamices #200 y #4 logran capturar estos límites.

Desde el punto de vista del diseño, la velocidad de disipación del exceso de presión de poros discrimina entre análisis en condiciones “drenadas” o en condiciones “no drenadas”. Típicamente, las condiciones de carga “drenadas” están asociadas a suelos de grano grueso, en tanto que las de carga “no drenadas”, a suelos de grano fino. Sin embargo, un suelo de grano grueso pero con la presencia de sólo ~10% de finos ve afectada grandemente su permeabilidad, haciendo que su valor cambie en órdenes de magnitud. Consecuentemente, el SUCS tiene un rango del 5% al 12% de contenido de finos que modifica la clasificación de suelos. En efecto, un suelo granular con relación de vacíos $e \sim 0,6$ colmata su espacio intersticial con ~5% a 15% de finos. En la ausencia de finos, el empaquetamiento de granos en suelos gruesos (gravas o arenas) depende del coeficiente de uniformidad $C_u = D_{60}/D_{10}$; este determina las máximas y mínimas relaciones de vacío que un determinado suelo granular puede alcanzar (ver también Sección 3.4). El coeficiente de curvatura $C_c = D_{30}^2 / (D_{10} \cdot D_{60})$ agrega información acerca de la convexidad de la curva granulométrica, indicando la presencia de diámetros extremos.

Por otro lado, los límites de Atterberg son escogidos para clasificar los suelos finos. Estos ensayos cuantifican la superficie específica, cuya importancia se detalla en la Sección 3.1, y la formación de fábrica. Los ensayos de límites de consistencia deben ser realizados con el mismo fluido que estará involucrado durante la vida útil del proyecto ya que el tipo y concentración de iones afectan el espesor efectivo de la capa difusa y las fuerzas de repulsión entre partículas.

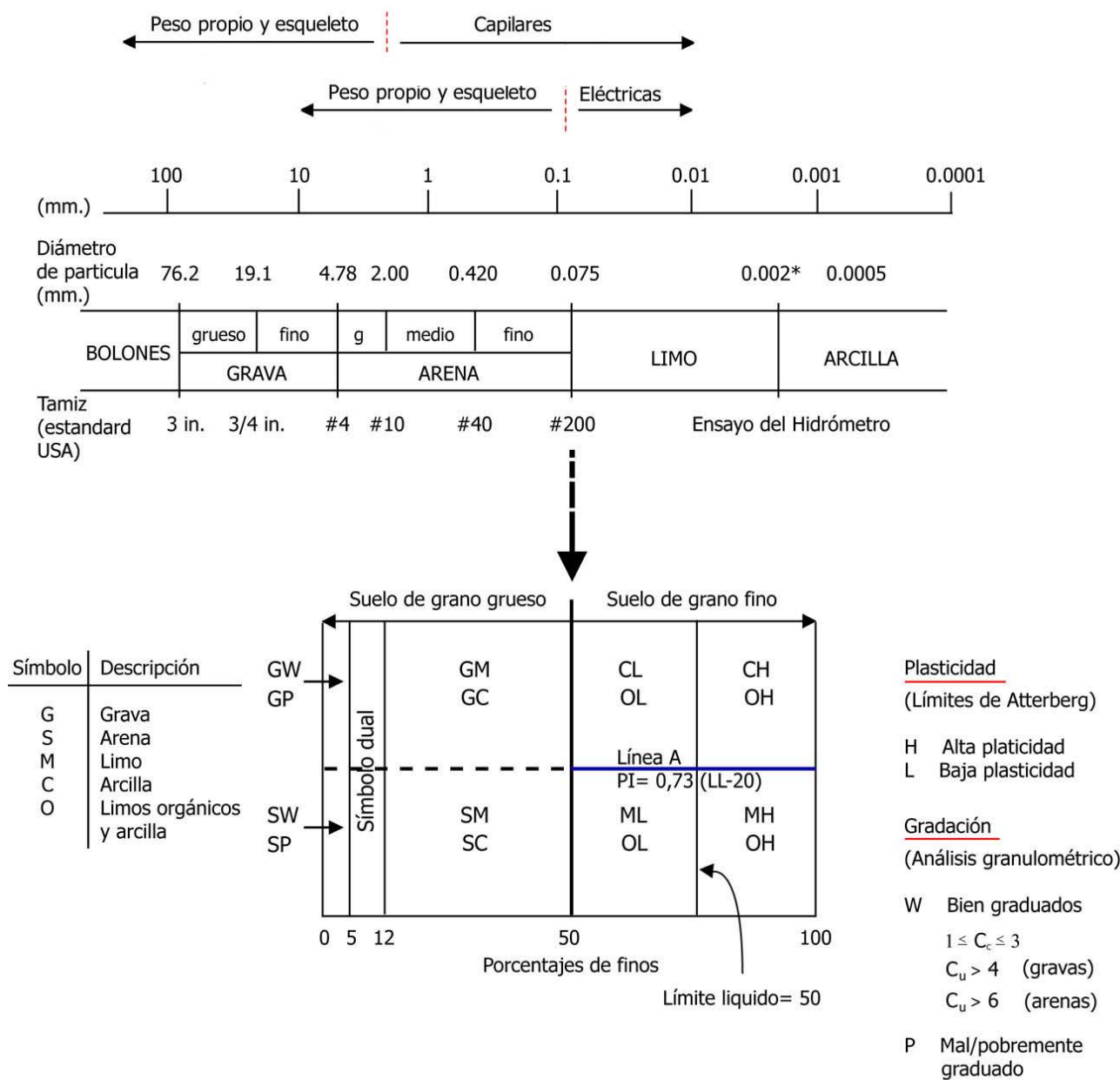


Figura 2: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Está basado en el análisis granulométrico y los límites de Atterberg. El tamaño de las partículas determina la naturaleza de las fuerzas que gobiernan el comportamiento de los suelos. Fuerzas de naturaleza eléctrica (atractivas de van der Waals y repulsivas de doble capa) predominan en partículas menores a 75 μm (Tamiz #200).

3. TÉCNICAS SENCILLAS COMPLEMENTARIAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS

El entendimiento del comportamiento de los suelos permite reconocer parámetros que no son adecuadamente considerados en la clasificación del SUCS y en la rutina del laboratorio geotécnico, incluyendo: superficie específica, máximo módulo cortante, parámetros del estado crítico, forma de los granos y variabilidad espacial de las propiedades. A continuación, se presenta una discusión sucinta de estos parámetros y la descripción detallada de técnicas sencillas para cuantificarlos. Su

incorporación a la rutina del laboratorio promueve un mejor entendimiento del comportamiento de los suelos. (Nota: otros parámetros de crucial importancia incluyen el grado de saturación y la relación de vacíos de campo. Su determinación va más allá del objetivo de este manuscrito). La bibliografía al final de este manuscrito incluye trabajos que proveen mayor detalle de cada uno de estos procesos y su interpretación geotécnica.

3.1 SUPERFICIE ESPECÍFICA S_e – ABSORCIÓN DE AZUL DE METILENO

La superficie específica S_e es definida como la relación ente la superficie de una partícula A_p y su masa m . Resulta una medida independiente y complementaria al análisis granulométrico. Su valor determina el balance entre fuerzas capilares, eléctricas y gravimétricas actuantes sobre las partículas, afecta la fábrica, la permeabilidad, y controla la adsorción y retardación durante la difusión química. (Santamarina *et al.* 2001). La Tabla 1 muestra la superficie específica teórica para diferentes geometrías. Las ecuaciones en esta tabla confirman que la S_e está controlada por la menor dimensión de las partículas.

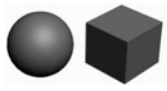
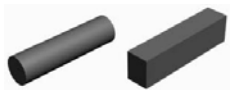
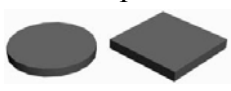
Los límites de Atterberg son una expresión de la superficie específica de los suelos. En efecto, para una capa de agua absorbida de espesor h el contenido de humedad w para partículas aplanadas es:

$$w = h \cdot S_e \cdot \rho_w \quad (1)$$

siendo ρ_w la densidad del agua. Evidencia experimental confirma que el límite líquido se relaciona con la S_e (Farrar y Coleman 1967):

$$S_e [m^2 / gr] = 1,8 \cdot LL[\%] - 34 \quad (2)$$

Tabla 1: Superficie específica teórica para distintas geometrías

Forma o Geometría	Dimensiones	Ejemplos	Superficie específica
 <p>Esferas y cubos</p>	Diámetro (o lado) D	Alofanas	$S_e = \frac{6}{D \cdot \rho_w \cdot G_s}$
 <p>Cilindros y primas</p>	Diámetro (o lado) D , largo L (con $L \gg D$)	Haloisita, Imogolita	$S_e = \frac{4}{D \cdot \rho_w \cdot G_s}$
 <p>Formas aplanadas</p>	Espesor t , ancho D , y largo L (con $t \gg L \gg D$)	Montmorillonita, Caolinita, Mica	$S_e = \frac{2}{t \cdot \rho_w \cdot G_s}$

ρ_w = densidad del agua, G_s = gravedad específica, S_e = superficie específica

Existen diferentes técnicas para la determinación de la S_e : 1) absorción de moléculas de una solución - método aconsejado en suelos expansivos; 2) absorción de moléculas en estado gaseoso, como por ejemplo nitrógeno, vapor de agua o CO_2 ; y 3) otras técnicas basadas en propiedades termodinámicas, en difusividad de los patrones de difracción de rayos X, o en propiedades eléctricas.

La técnica de absorción de azul de metileno corresponde al primer grupo. Es una técnica sencilla, económica y conveniente para cualquier laboratorio. El catión de azul de metileno, AM, tiene forma prismática de dimensiones $17\text{Å} \times 7,6\text{Å} \times 3,25\text{Å}$. La superficie máxima cubierta por un catión de

AM es $\sim 130 \text{ \AA}^2$, aunque puede ser menor dependiendo de la orientación del catión con respecto a la superficie de la arcilla que lo absorbe. Los cationes de una solución acuosa de cloruro azul de metileno (peso molecular 319,87 g/mol, Figura 3) son absorbidos por las cargas negativas de la superficie de las arcillas. La S_e es computada con la cantidad del AM absorbido.

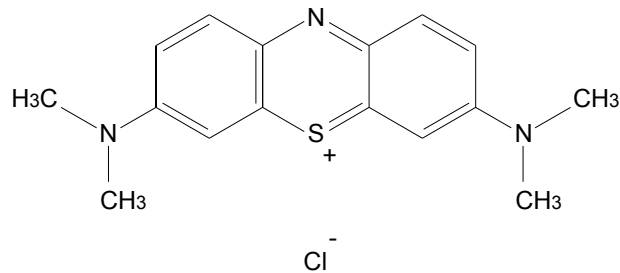


Figura 3: Estructura del catión de azul de metileno, correspondiente al cloruro azul de metileno $C_{16}H_{18}N_3S^+ \cdot Cl^-$, de acuerdo a estándar DIN 58981. La máxima superficie cubierta por un catión es de 130 \AA^2 .

Los pasos a seguir en la técnica de absorción de AM utiliza capilaridad en papel de filtro para detectar exceso de catión AM:

1. Preparar la solución acuosa de AM mezclando 1,0 gr. de polvo seco de AM con 200 mL de agua deionizada.
2. Preparar una suspensión de suelo mezclando 10,0 gr. de suelo secado a horno con 30 mL de agua deionizada.
3. Agregar la solución de AM a la suspensión de suelo en incrementos de 0,5 mL.
4. Mezclar la suspensión durante un minuto para dar tiempo al catión AM de ser absorbido sobre la superficie mineral, reemplazando los cationes en la capa difusa.
5. Colocar una gota de la suspensión sobre papel de filtro tipo P5 ($\sim 95 \text{ g/m}^2$, $\sim 4 \text{ mL/min}$ de flujo; por ejemplo Fisherbrand P5). La gota se absorbe por capilaridad formando una marca circular.
6. Terminar el ensayo cuando un halo azul claro se forma concéntricamente alrededor de la gota sobre el papel, como muestra la Figura 4. Este “punto final” indica exceso de AM en el fluido, es decir, saturación de la superficie mineral.
7. Registrar el número N de incrementos de 0,5 mL de AM necesarios para alcanzar el “punto final” y computar la S_e como:

$$S_e = \frac{1 \text{ gr}}{319,87 \text{ gr/mol}} \cdot \frac{1}{200 \text{ mL}} \cdot (N \cdot 0,5 \text{ mL}) \cdot N_{Av} \cdot A_{AM} \cdot \frac{1}{10 \text{ gr}} \quad (3)$$

donde $N_{Av} = 6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}$ es el Número de Avogadro y A_{AM} es el área cubierta por un catión de AM, asumida generalmente en 130 \AA^2 .

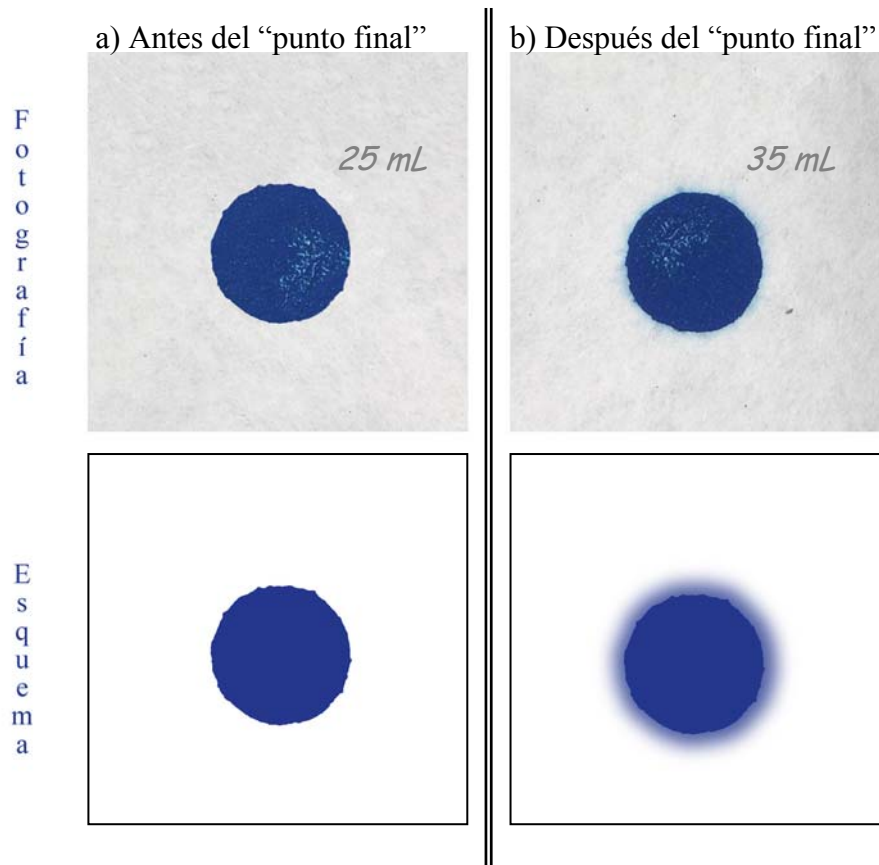


Figura 4: Determinación de la superficie específica con solución de Azul de Metileno. a) Gota de la suspensión mineral sobre papel de filtro tipo P5 antes del “punto final”. b) Gota después del “punto final” cuando un *halo* azul claro se forma alrededor.

3.2 MÓDULO DE CORTE MÁXIMO G_{MAX} – “BENDER ELEMENTS”

Uno de los parámetros del suelo más importante para el diseño geotécnico es el máximo módulo cortante G_{max} , por ejemplo, los siguientes análisis se basan en G_{max} : cálculos de asentamientos y deformaciones en general, diseño de fundaciones sujetas a cargas dinámicas, evaluación del potencial de licuefacción, y el monitoreo de mejoramiento de suelos. El valor de G_{max} puede ser fácilmente obtenido en celdas de laboratorio mediante el uso de “bender elements” a través de mediciones de velocidad de propagación de ondas de corte V_s , que relaciona el modulo G_{max} con la densidad del suelo ρ_s :

$$G_{max} = \rho_s \cdot V_s^2 \quad (4)$$

Los fenómenos de piezoelectricidad fueron descubiertos por Jacques y Pierre Curie in 1880: cuando una carga mecánica es aplicada a un piezo-material, la estructura molecular distorsiona el momento bipolar del cristal y un voltaje es generado; recíprocamente, si una diferencia de potencial es aplicada, el piezocristal se deforma. Los “bender elements” (elementos flexantes) son transductores piezoeléctricos bicapa y consisten de dos electrodos externos, dos capas de un piezocerámico y una membrana metálica en el centro (Figura 5-a). Los “bender elements” pueden ser construidos para conexión en serie o en paralelo, tal como muestra la Figura 5. La conexión en paralelo provee dos veces el desplazamiento de la conexión en serie y se prefiere como fuente.

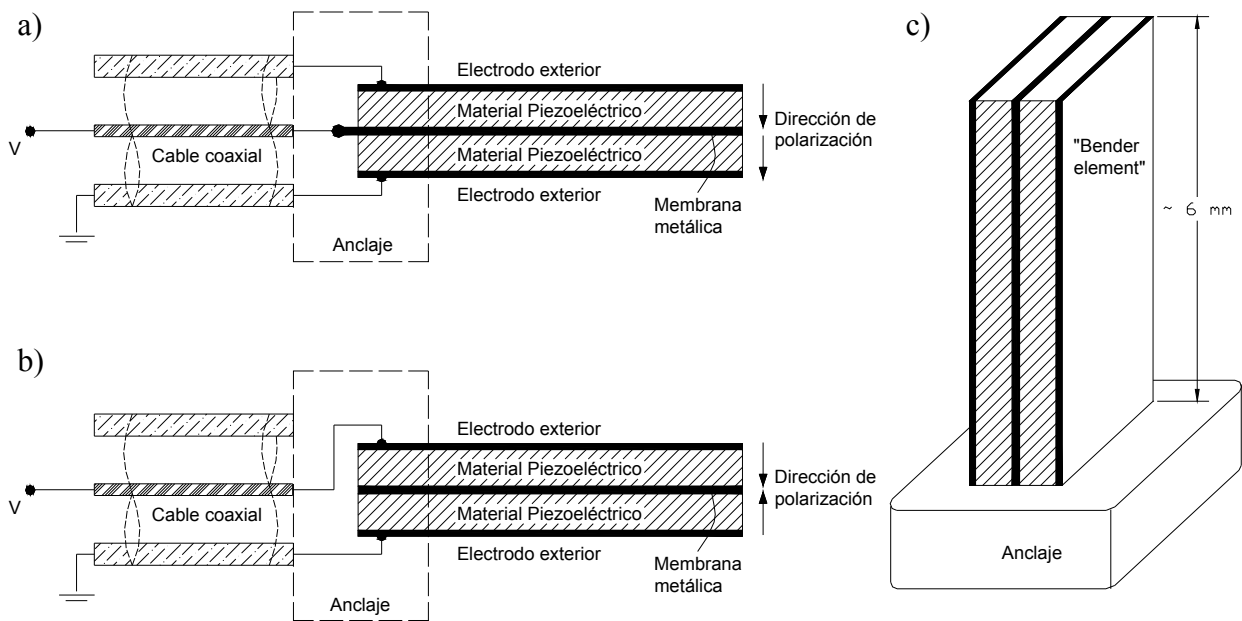


Figura 5: “Bender elements”: a) Configuración en paralelo. b) Configuración en serie. c) Vista de un “bender element” en su anclaje.

Las dificultades asociadas al uso de estos transductores para generar y recibir ondas de corte en la masa de suelo son: (i) cross-talk debido al acoplamiento electromagnético a través del suelo, (ii) generación simultánea de ondas P (u ondas primarias o de compresión) y ondas S (u ondas secundarias o de corte), (iii) efectos del “campo cercano” y determinación del primer arribo de la onda S. El procedimiento que se especifica a continuación minimiza o anula estas dificultades.

La Figura 6 muestra un esquema de montaje y configuración experimental típica. El uso de dos “bender elements” con configuración en paralelo como fuente y receptor anula el efecto de cross-talk si los electrodos externos son conectados a tierra. Una vez conectados, los “bender elements” se pintan o bañan con poliuretano para aislarlos. Finalmente, se los cubre con pintura conductiva conectada a tierra para evitar ruido eléctrico.

La generación simultánea de ondas P y S puede afectar la recepción (Figura 6, ondas de compresión P+ y rarefacción P- son generadas en la región inmediata normal al plano del “bender element”). Dado que las ondas P son más veloces que las S, conviene que la relación entre la distancia entre extremos de los transductores L y el radio del espécimen R sea:

$$R > \frac{1}{2 \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \nu}} \cdot L \quad (5)$$

donde ν es la relación de Poisson del suelo. Tentativamente, para suelos no saturados, $R > 0,6L$; y para suelos saturados, $R > 3,7L$.

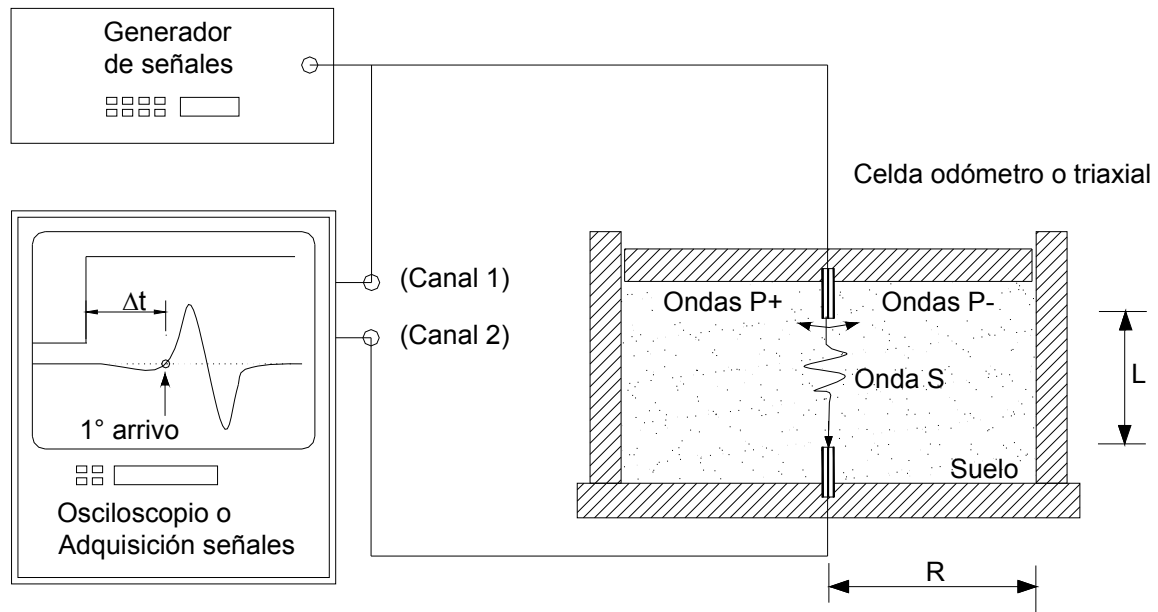


Figura 6: Montaje de “bender elements” en odómetro o en celda triaxial para la determinación de velocidad de transmisión de onda de corte, V_s . La señal de entrada (canal 1) es una función escalón. El primer arribo es determinado en el cero después de la primera inflexión en la señal de salida (canal 2). Luego, $V_s = L / \Delta t$, siendo Δt el tiempo transcurrido entre el inicio de la función escalón y el primer arribo, y L la separación entre los extremos de los “bender elements”.

La frecuencia de resonancia f_r de los “bender elements” rodeados de suelo depende de la densidad ρ_s y velocidad V_s del suelo y de la longitud en voladizo L_b (fuera del anclaje) del piezomaterial. Su valor estimado es:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1,875^4 \cdot \frac{E_b \cdot I}{(\alpha \cdot L_b)^3} + 2 \cdot V_s^2 \cdot (1 + \nu) \cdot L_b}{\rho_b \cdot b \cdot t \cdot (\alpha \cdot L_b) + (\rho_s \cdot b^2 \cdot L_b) \cdot \beta}} \quad (6)$$

donde E_b es el módulo elástico del piezocristal, típicamente $E_b = 6,2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$; su densidad $\rho_b = 7500 \text{ kg/m}^3$; y b y t son el ancho y espesor del “bender element” respectivamente.

La respuesta de estos transductores se ve mejorada cuando la señal de entrada tiene una frecuencia cercana a la de resonancia. Sin embargo, cuando f_r resulta desconocida o cuando ésta cambia rápidamente durante el ensayo, es conveniente emplear una función escalón como señal de entrada (Figura 6).

Finalmente, es importante remarcar que la extracción de muestras altera el valor de G_{max} , aún en muestras bloques. Por ello, la medición de campo con cross-hole o cono sísmico (CPT sísmico) es siempre ventajosa (ver la bibliografía para obtener información sobre los efectos de extracción de muestras).

3.3 PARÁMETROS DEL ESTADO CRÍTICO – PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO

Taylor (1948), Roscoe, Schofield y Wroth (1958) y Schofield y Wroth (1968) desarrollaron el concepto de mecánica de suelos en estado crítico, el cual constituye uno de los criterios más

robustos para el diseño por resistencia. Los parámetros del estado crítico son típicamente determinados a partir de ensayos triaxiales. Sin embargo, su uso no es de práctica común en la ingeniería geotécnica debido a su alto costo. Un método simplificado para la determinación de los parámetros del estado crítico en suelos arenosos se describe a continuación. El método resulta confiable, económico y rápido, y puede ser utilizado tanto en laboratorio como en campo. Es esencialmente una forma muy simplificada de un ensayo triaxial axisimétrico. La Figura 7 muestra los componentes del equipo y la configuración experimental.

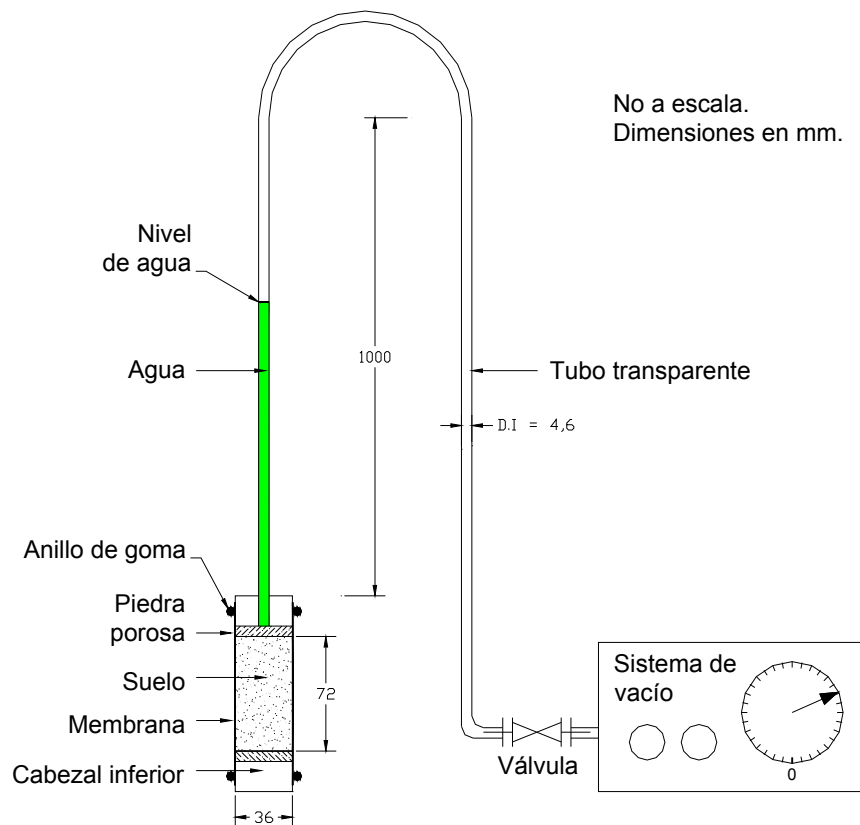


Figura 7: Instrumentos y configuración experimental para la determinación de parámetros del estado crítico de suelos por el método simplificado.

Bomba de vacío, una membrana de látex fina, dos cabezales, dos anillos de goma (O-rings), un cilindro graduado, una piedra porosa y un tubo semi-rígido transparente (se sugiere Teflón, diámetro interno 0,46 cm y presión nominal máxima 1700 kPa) completan el equipo. El cabezal superior con la piedra porosa se conecta a un extremo del tubo transparente (para monitorear el cambio de volumen en el suelo) y el otro extremo de tubo se conecta a un sistema de vacío (para aplicar confinamiento). Los pasos a seguir son:

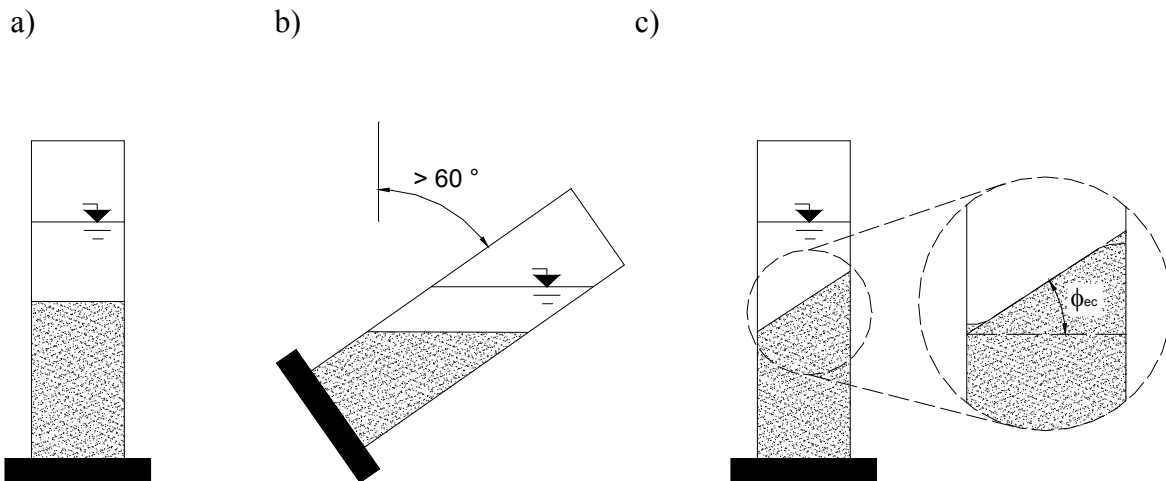


Figura 8: Método simplificado para determinar el ángulo del estado crítico: a) verter el suelo en un cilindro de 1000 mL lleno de agua. b) Voltear al cilindro un ángulo mayor a 60° con la vertical. c) retornar lentamente el cilindro a su posición vertical y medir el ángulo de reposo en la zona central de la pendiente.

1. Determinar el ángulo de fricción en estado crítico siguiendo el procedimiento explicado en la Figura 8: ϕ_{ec} .
2. Mediciones preliminares para la determinación de la línea crítica en $e - \ln p'$:
 - a. Sección transversal interna del tubo semi-rígido transparente: A_t .
 - b. Peso específico del agua corregido por temperatura: γ_w .
 - c. Volumen del equipo que contiene al suelo: Colocar los cabezales, la membrana, los anillos de goma, la piedra porosa y una longitud predeterminada del tubo en un frasco graduado con agua y medir el volumen desplazado: V_d .
3. Mezclar aproximadamente 300 gr de suelo con 2 L de agua y de-airear la mezcla ya sea aplicando vacío o hirviéndola.
4. Preparar el espécimen bajo agua, vertiendo gradualmente suelo en la membrana, hasta una altura de aproximadamente dos veces el diámetro. El tubo semi-rígido debe estar lleno de agua hasta la altura predeterminada en el paso 2. No compactar el suelo.
5. Colocar el cabezal superior y sujetar la membrana con el anillo de goma. Aplicar máximo vacío y aplastar el espécimen para remover el aire atrapado. Liberar el vacío y dar forma cilíndrica manteniendo el espécimen en estado suelto.
6. Aplicar vacío a la muestra, σ'_c .
7. Aplicar presión vertical a mano o con una mordaza hasta obtener una deformación vertical de aproximadamente 40%. Anotar el nivel del agua, h_i .
8. Liberar el vacío, rotar repetidamente la muestra hacia arriba y abajo, y remodelarla a mano para que tome su forma cilíndrica original. El espécimen debe quedar suelto y homogéneo.
9. Repetir pasos 7 y 8 unas 5 veces a diferentes niveles de vacío, registrando σ'_{ci} y h_{ci} , donde $i=1,2,\dots,5$.
10. Marcar un nivel de agua de referencia, h_0 , a un nivel de vacío intermedio y medir el volumen total de la muestra de suelo con el resto del equipo, V_t , como en el paso 2-c.
11. Desarmar el equipo y determinar el peso del suelo seco, W_s .

12. Determinar la corrección por rigidez de la membrana: inflar la membrana de modo de obtener una deformación lateral similar a la observada durante el ensayo y registrar esta presión, σ'_m (Santamarina y Cho 2001 reportan $\sigma'_m = 7$ kPa, para 40% deformación axial y un diámetro máximo igual a 1,6 veces el diámetro inicial).

Este procedimiento permite obtener la pendiente M de la proyección de la línea de estado crítico en el espacio $p'-q$ (Cambridge), la pendiente λ de la proyección en el espacio $e-\ln(p'/1kPa)$, y la relación de vacíos Γ que es la ordenada al origen a $p'=1kPa$. Los cálculos necesarios son resumidos a continuación:

$$\varphi_{ec} \quad \rightarrow \quad M = \frac{q}{p'} = \frac{6 \cdot \text{sen}(\varphi_{ec})}{3 - \text{sen}(\varphi_{ec})} \quad (7)$$

$$\sigma'_{3i} = \sigma'_{ci} + \sigma'_m \quad \rightarrow \quad p'_i = \sigma'_{3i} \left(\frac{3 - \text{sen}(\varphi_{ec})}{3 \cdot (1 - \text{sen}(\varphi_{ec}))} \right) \quad (8)$$

$$V_s = W_s / (G_s \cdot \gamma_w) \rightarrow V_{w0} = V_t - V_d - V_s \quad \rightarrow \quad V_{wi} = V_{w0} - \Delta V_i \rightarrow e_i = \frac{V_{wi} \cdot G_s \cdot \gamma_w}{W_s} \quad (9)$$

$$d_i = h_0 - h_i \quad \rightarrow \quad \Delta V_i = d_i \cdot A_t$$

3.4 FORMA DE LAS PARTÍCULAS – CARTAS DE IDENTIFICACIÓN

Dada la naturaleza granular de los suelos, la forma de las partículas tienen una influencia importante en su comportamiento, sobre todo en suelos de grano grueso (Leonards 1950). La forma de los granos se establece a tres escalas diferentes: 1) esfericidad, 2) redondez (versus angularidad), y 3) rugosidad superficial (a la escala de los contactos inter-granulares). La esfericidad S se determina como la relación entre el radio de la máxima esfera inscrita en el grano r_{max} y el radio de la esfera más pequeña circunscrita en él r_{min} (otras definiciones pueden ser adoptadas - Hawkins 1993). La redondez R se define como el radio de curvatura promedio de la superficie granular con respecto al radio de la esfera más grande que puede ser inscrita en la partícula. Tanto S como R pueden ser identificados fácilmente mediante el uso de cartas de identificación (en 2D), como la que se presenta en la Figura 9. La determinación directa de la rugosidad requiere la utilización de técnicas microscópicas aún en partículas gruesas, por ejemplo: microscopio óptico focal, microscopio electrónico, o microscopio de fuerza atómica.

La angularidad de las partículas afecta el arreglo de los granos en un suelo. Partículas menos angulares tienden a formar arreglos más densos o compactos. La importancia relativa de la angularidad con respecto al coeficiente de uniformidad C_u en la relación de vacíos máxima y mínima de arenas se denota claramente en la Figura 10.

Desviaciones de esfericidad controlan la anisotropía inherente (durante la formación del depósito) e inducen anisotropía en resistencia, fábrica, conducción, rigidez y difusión (Casagrande 1932, Leonards 1950). La Tabla 2 resume evidencia teórica y experimental de los efectos de la geometría de las partículas en las propiedades de los suelos.

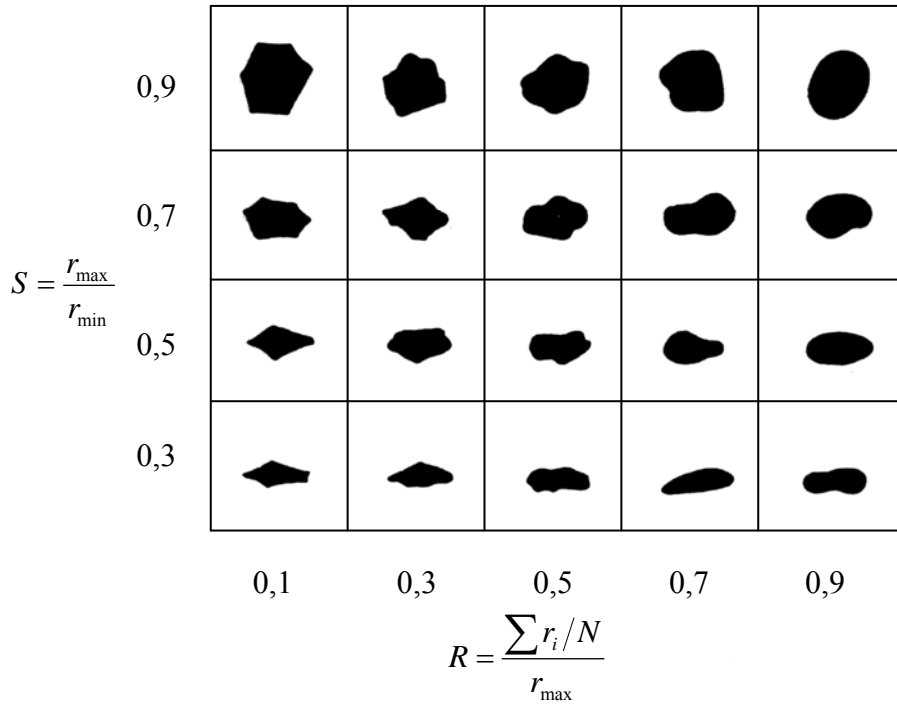


Figura 9: Carta de Esfericidad S y Redondez R (Krumbein y Sloss 1963).

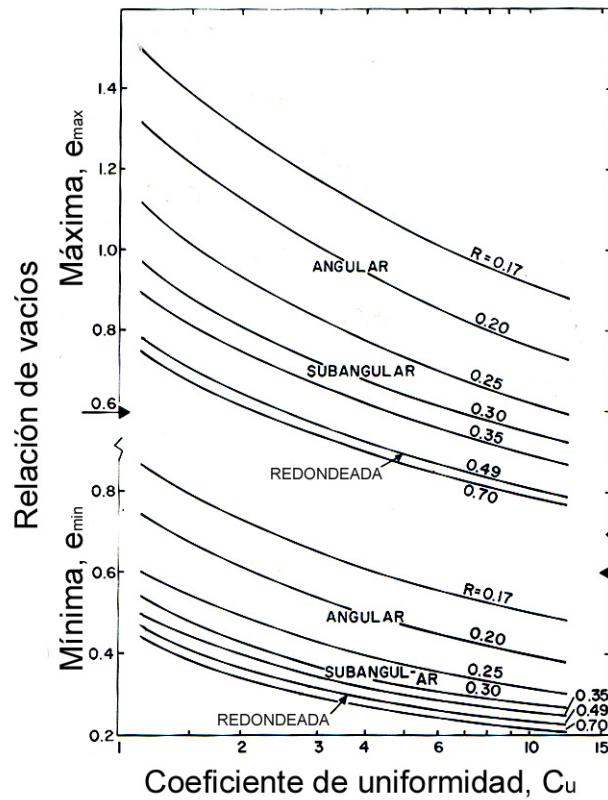


Figura 10: Variación de las relaciones de vacíos extremas e_{\max} y e_{\min} con el coeficiente de uniformidad $C_u = D_{60}/D_{10}$ y la redondez R (modificado de Youd 1973).

Tabla 2: Efectos de la geometría de las partículas en ciertos parámetros de los suelos.

Parámetro	Relación con la Geometría de las partículas
Relación de vacíos máxima, e_{max}	$e_{max} = 0,554 + 0,154 / R$ (Para $C_u=1$)
Relación de vacíos mínima, e_{min}	$e_{min} = 0,359 + 0,082 / R$ (Para $C_u=1$)
Anisotropía de rigidez: Para ondas P	$\frac{V_{P-max}}{V_{P-min}} = \frac{L_{max}}{L_{min}}$ (teoría de Hertz)
Para ondas S	$\frac{V_{S-max}}{V_{S-min}} = 1,1 a 1,5$ (experimentalmente)
Resistencia a fricción a volumen constante, ϕ_{vc}	$\phi_{vc} = 42 - 17 \cdot R$
Angulo máximo de dilatancia, ψ	$\tan(\psi) = \left(\frac{L_N}{L_T} \right) \cdot \tan(30)$ (teórico)
Superficie específica, S_e <i>Cte</i> = función(geometría de la partícula) Véase Tabla 1.	$S_e = \frac{Cte}{L_{min} \cdot \rho_w \cdot G_s}$

Nota: R es la redondez, C_u es el coeficiente de uniformidad, L_{max} y L_{min} son las dimensiones máxima y mínima de los granos, V_{P-max} es la velocidad de onda P en la dirección de la máxima dimensión de los granos, L_N y L_T son las dimensiones de los granos en las direcciones de aplicación de fuerzas Normales y Tangenciales.

Fuentes: Youd (1973), Chan y Page (1997), Santamarina *et al.* (2001)

3.5 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL FLUIDO INTERSTICIAL – REFRACTÓMETRO DE SALINIDAD

La conductividad eléctrica de los suelos refleja el movimiento de iones en respuesta a la aplicación de una diferencia de potencial. Los principales factores que afectan la conductividad eléctrica son la porosidad, el grado de saturación, la fábrica, la concentración de sales en el fluido intersticial, la superficie específica (conducción en la capa difusa) y la temperatura. La relación básica entre la conductividad del suelo σ_{suelo} y la conductividad del electrolito $\sigma_{electrolito}$ a través de la porosidad del suelo n , está captada en la ley de Archie (Rinaldi y Cuestas 2003):

$$\sigma_{suelo} = \sigma_{electrolito} \cdot n^{\beta} \quad (10)$$

donde β es un factor obtenido por calibración cuyo valor oscila entre 1,0 y 2,4. Los parámetros que definen σ_{suelo} tienen también influencia significativa en las características físicas y mecánicas de los suelos, en particular la tendencia dispersiva o floculante y la sensibilidad.

La relación entre la conductividad del fluido $\sigma_{electrolito}$ [en mS/m] y la concentración de sales TSD (total de sales disueltas, en mg/L) se estima con la siguiente expresión empírica (Annan 1992):

$$\sigma_{electrolito} = 0,15 \cdot TSD \quad (\text{para bajas concentraciones}) \quad (11)$$

El uso de un refractómetro permite obtener la salinidad (*TSD*) de los fluidos intersticiales en forma expedita tanto en el laboratorio como en el campo, sin requerir componentes electrónicos. La medición consiste en depositar una gota del fluido intersticial en el refractómetro (Figura 11-a) y leer la salinidad en la escala sobre la que se proyecta la luz refractada.



Figura 11: Medición de conductividad del fluido intersticial. a) Refractómetro de salinidad b) mira y escala de salinidad.

3.6 CARGAS ELECTRICAS EN SUELOS FINOS – CEC

La “capacidad de intercambio de cationes” CEC (por sus siglas en ingles: cation exchange capacity) es una medida de la carga eléctrica de las partículas de suelos. Particularmente relevante en los suelos finos, la $CEC \approx S_e \rho_s$ mide la superficie específica S_e y la carga eléctrica de superficie ρ_s . Suelos con alto CEC son propensos a acoplamientos quimo-hidro-mecánicos cuando invaden fluidos que posean distintas características químicas (concentración iónica y de pH).

3.7 VARIABILIDAD ESPACIAL – LA SONDA ELÉCTRICA

La respuesta macroscópica de los suelos se ve afectada por la interacción de escalas espaciales y temporales internas de los mismos. La variabilidad espacial de las propiedades de los suelos afecta el comportamiento global en problemas de flujo de agua, de asentamientos, y de estabilidad de taludes entre otros. La variabilidad espacial también afecta mediciones de laboratorio. Por ejemplo, distintos métodos de preparación de muestras afectan la distribución espacial de la relación de vacíos y esto hace que la resistencia a corte varíe grandemente (~200 a 300%) (Ladd 1974).

Una técnica simple y efectiva para detectar variabilidad espacial en muestras de laboratorio y con resolución sub-milimétrica consiste en realizar mediciones de resistencia eléctrica de los suelos mediante una sonda del tamaño de una aguja (~2 mm de diámetro). La sonda es un conductor coaxial que se construye insertando un hilo de cobre esmaltado (el conductor interno) dentro de un tubo metálico fino, que puede ser una aguja hipodérmica desechable (el conductor externo) y llenando el espacio anular restante con una resina epoxi (Figura 12). Luego la punta se lima para obtener un doble bisel.

La Figura 13 muestra un ejemplo de la configuración experimental y circuitos equivalentes con el uso de una resistencia conocida $R_{conocido}$, un generador de señales y un osciloscopio de dos canales. La señal de entrada V_{sg} es una función seno con frecuencia ~100kHz para minimizar efectos de corrosión, polarización de electrodos y la resonancia eléctrica del circuito. La resistencia del suelo R_{suelo} se computa en función del voltaje pico-a-pico V_{sg} medido en el canal 1 (señal generada de

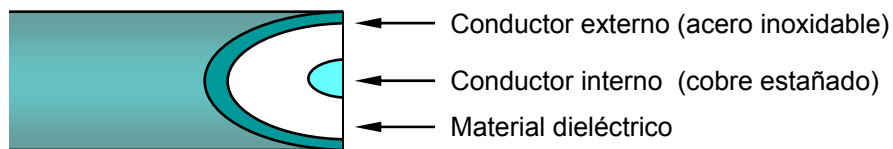
entrada), el voltaje pico-a-pico V_{sa} medido en canal 2 (señal recibida o de salida), y la resistencia del osciloscopio R_{osc} :

$$R_{suelo} = \frac{V_{sa}}{\frac{V_{sg} - V_{sa}}{R_{conocido}} - \frac{V_{sa}}{R_{osc}}} \approx \frac{V_{sa}}{V_{sg} - V_{sa}} \cdot R_{conocido} \quad (12)$$

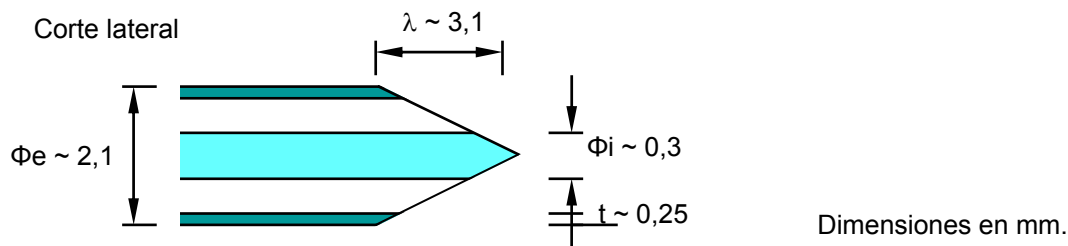
La expresión aproximada es válida para $R_{osc} \gg R_{suelo}$. La resistencia medida R_{suelo} está relacionada con la resistividad ρ_{suelo} a través de un factor de forma α que puede ser determinado mediante calibración con electrolitos de resistividad conocida.

$$R_{suelo} = \alpha \cdot \rho_{suelo} \quad (13)$$

Vista superior



Corte lateral



Dimensiones en mm.

Figura 12: Punta de la sonda eléctrica. La punta está biselada no sólo para facilitar la penetración sino también para generar el campo eléctrico al frente de la sonda en la zona no perturbada por la inserción. Las dimensiones mostradas son a título orientativo.

A modo de ejemplo, la Figura 14 muestra perfiles de resistencia obtenidos en muestras formadas por pluviación bajo agua y sometidas a compactación en una capa. Se observa que la técnica de pluviado no produce muestras homogéneas: hay gradientes de densidad (posiblemente por segregación de finos) y formación de estratos porosos. La compactación con un cilindro de 25 mm de diámetro a profundidad $z \sim 35$ mm afecta una zona de aproximadamente 20 mm.

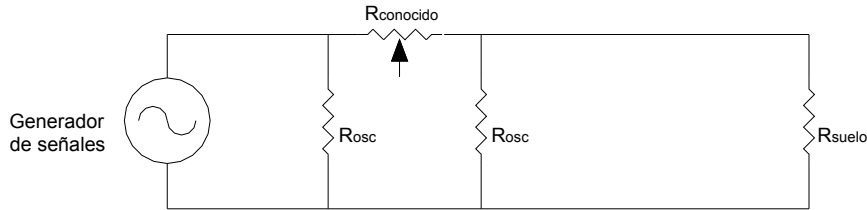
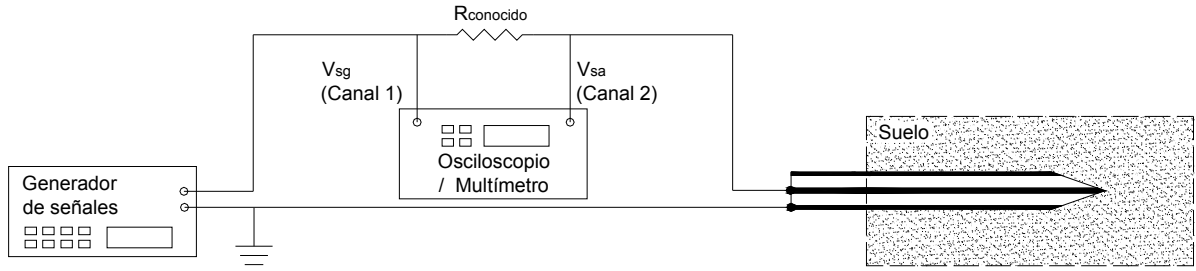


Figura 13: Sonda eléctrica. Configuración experimental y circuito equivalente con el uso de un generador de señales y un osciloscopio o multímetro de dos canales. $R_{conocido}$ es una resistencia conocida (al igual que la resistencia del osciloscopio R_{osc}) que debe ser variada a fin de obtener la misma cantidad de dígitos significativos en los dos canales.

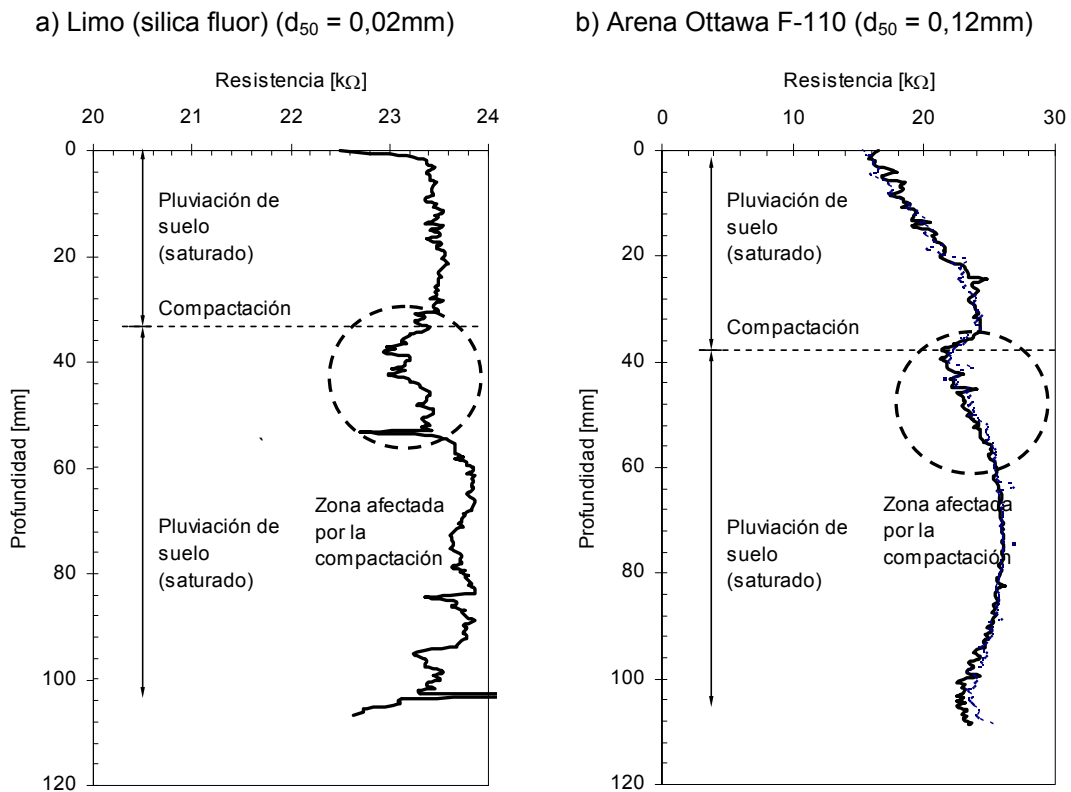


Figura 14: Detección de cambios locales en la relación de vacíos de un espécimen que ha sido preparado por pluviación en agua, con compactación únicamente en una capa a media altura. La sonda eléctrica permite obtener resolución milimétrica de los cambios locales de R_{suelo} (o porosidad).

4. RESUMEN Y RECOMENDACIONES

Los suelos están formados por partículas sólidas, fluidos intersticiales y microorganismos. El sistema unificado de clasificación de suelos SUCS (ASTM D 2487) intenta categorizar los suelos según su comportamiento. Los fundamentos físicos que dan sustento al SUCS reflejan el balance entre las fuerzas a nivel de las partículas, habilidad de ensamblaje (suelos gruesos sin finos) condiciones de drenaje (suelos gruesos con finos), efectos de superficie (suelos finos) y fuerzas capilares. El SUCS no provee información que hoy se reconoce de mucha importancia: geometría de los granos, superficie específica, rigidez, diagénesis, densidad in-situ y grado de saturación, características del fluido intersticial, parámetros del estado crítico, y variabilidad espacial.

Varios ensayos de laboratorio sencillos son propuestos en este trabajo para complementar la caracterización de los suelos. Estos incluyen: superficie específica por el método de absorción de azul de metileno, módulo de corte máximo por propagación de ondas de corte con “bender elements”, parámetros del estado crítico por método simplificado, forma de las partículas mediante cartas de esfericidad y redondez, conductividad eléctrica del fluido con refractómetro de salinidad, y variabilidad espacial mediante el uso de sonda eléctrica.

AGRADECIMIENTOS

Financiamiento para estos estudios fueron otorgados por NSF (National Science Foundation), MAEC (Mid-America Earthquake Center) y la Goizueta Foundation.

TRABAJOS COMPLEMENTARIOS

Los siguientes trabajos que proveen mayor detalle en algunos temas cubiertos en este manuscrito:

Propagación de ondas de corte y uso de “bender elements” en laboratorio:

Lee, J.S. y Santamarina, J.C. (2005), Bender Elements, *ASCE Journal Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, vol. 131, no. 9, pp. pp. 1063-1070.

Efectos de extracción de muestras en G_{max} :

Rinaldi, V.A. y Santamarina, J.C. (2008), Cemented Soils: Small Strain Stiffness, IS-Atlanta 2008.

Parámetros del estado crítico:

Santamarina, J.C. y Cho, G.C., 2001, Determination of critical state parameters in sandy soils - Simple procedure, *Geotechnical Testing Journal*, , Vol. 24, No. 2, 185-192.

Superficie específica:

Santamarina, J.C., Klein, K., Wang, Y.H. y Prencke, E., 2002, Specific Surface: Determination and Relevance. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 39, No.1, 233-241.

Variabilidad espacial y sonda eléctrica:

Cho, C.C., Lee, J.S. y Santamarina, J.C., 2004, Spatial variability in soils: high resolution assessment with electrical needle probe, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 130, No. 8, Agosto. 843-850.

Forma de las partículas:

Cho, G.C., Dodds, J.S., and Santamarina, J.C. (2006), Particle Shape Effects On Packing Density, Stiffness And Strength – Natural And Crushed Sands, *ASCE Journal Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, Vol. 132, no. 5, pp. 591-602.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Annan, A.P. (1992), Ground penetrating radar, Workshop Notes, Sensors and Software, Mississauga.
- Casagrande, A. (1932), Research on the Atterberg limits of soils, Public Roads, Vol. 13, 121-130 & 136.
- Casagrande, A. (1948), Classification and identification of soils, American Society of Civil Engineers, Transactions, Vol. 113, 901-991.
- Chan, L.C. y Page, N.W. (1997), Particle fractal and load effects on internal friction in powders, Powder Technology, Vol. 90, 259-266.
- Farrar, D.M. y Coleman, J.D. (1967), The correlation of surface area with other properties of nineteen British clays, Journal of Soil Science, Vol. 18. No. 1, 118-124.
- Hawkins, A.E. (1993), The shape of powder-particle outlines, Research Studies Press Ltd., Jhon Wiley & Sons, New York, pp 150.
- Krumbein, W.C. and Sloss, L.L. (1963), Stratigraphy and Sedimentation, 2nd ed., W. H. Freeman and Company, San Francisco, 660 pp.
- Ladd, R.S. (1974), Specimen preparation and cyclic stability of sands, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, GT10, 1180-1184.
- Leonards, G.A. (1950), Description and identification of soils: The engineering significance of descriptive soil terminology, Purdue University, reimpresso por Dr. Scott M. Merry en la Universidad de Arizona, Agosto 2000.15 pp.
- Rinaldi, V.A., y Cuestas, G.A. (2003), Ohmic Conductivity of a Compacted Silty Clay, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 10, 824-835.
- Roscoe, K.H.; Schofield, A.N. y Wroth, D.P. (1958), On the Yielding of Soils, Geotechnique, Vol. 9, 22-53.
- Santamarina, J.C. (2001), Soil behavior at the microscale, Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd, Octubre. MIT. 31 pp.
- Santamarina, J.C., Klein, K. y Fam, M. (2001), Soils and Waves, John Wiley & Son, Inc. 553 pp.
- Schofield, A.N. y Wroth, C.P. (1968), Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, New York NY, pp. 310.
- Taylor, D. W. (1948), Fundamentals of soil mechanics, John Wiley & Son, Inc. 699 pp.
- Youd, T.L. (1973), Factors controlling maximum and minimum densities of sands, Evaluation of relative density and its Role in geotechnical projects involving cohesionless soils, ASTM SPT 523, 98-112.