FACULTAD DE INGENIERÍA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)

Asignatura ACMIG03:

Comportamiento Mecánico de Suelos

Dr. Juan Pablo Ibañez
juan.pablo.Ibanez@ingenieria.uncuyo.edu.ar
+54 261 5796326

FACULTAD DE INGENIERÍA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)

Suelos no saturados

ACMIG03: Comportamiento Mecánico de Suelos

Dr. Juan Pablo Ibañez

juan.pablo.Ibanez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

+54 261 5796326

Introducción

- La Mecánica de los Suelos No Saturados es una rama reciente de la Mecánica de Suelos clásica.
- Analiza a partir de la termodinámica y la físico-química la interacción entre las fases sólido-agua-aire en la matriz de suelo.
- Nuevos ejes: Tres fases en vez de dos, validez del principio de las tensiones efectivas, interacción con el medio ambiente.
- Existen algunas Universidades pioneras en este tema:
  - UPC Barcelona (profesores Alonso y Gens)
  - University of Saskatchewan, Canadá (profesor Fredlund)
  - USP São Paulo (professor Marinho)
  - Profesor Juan Carlos Santamarina
  - Otras...

Introducción

- La Mecánica de los Suelos No Saturados es una rama reciente de la Mecánica de Suelos clásica, que está orientada a los suelos saturados (o secos).
- En Argentina hay gran cantidad de suelos no saturados, algunos de ellos con alta sensibilidad a variaciones de humedad, como son los suelos colapsibles y los suelos expansibles.

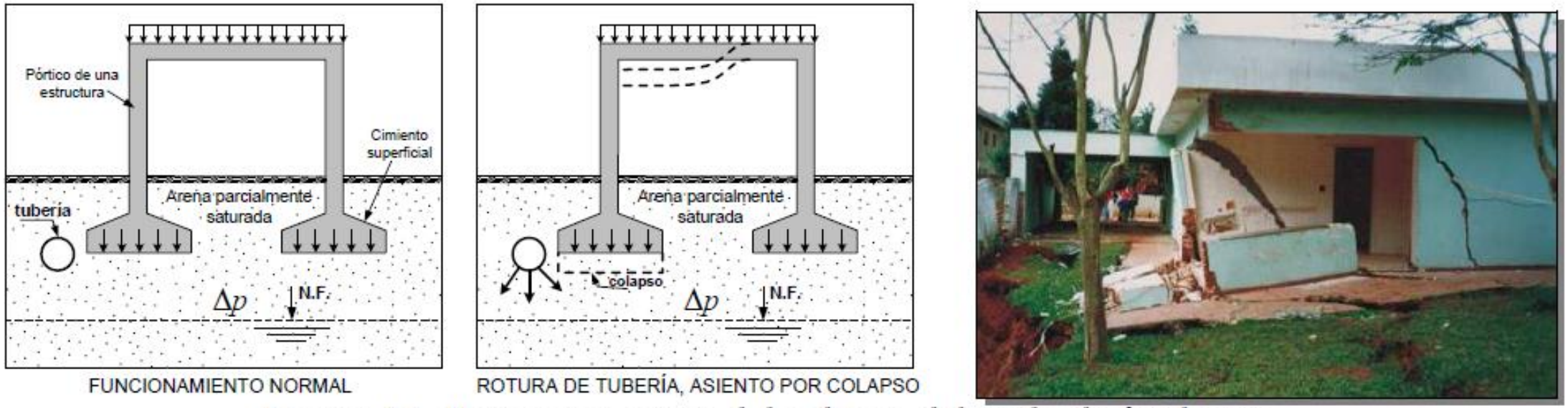


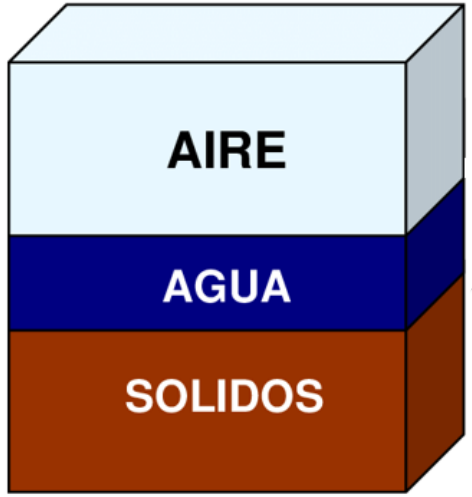
Figura 11. Daños por causa del colapso del suelo de fundación.

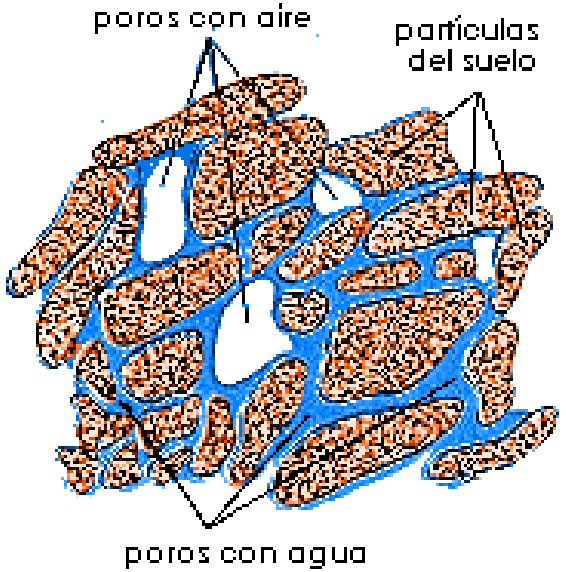
Temas introductorios

- El agua en el suelo
- Origen de los suelos no saturados
- Interacción de fases
- Concepto de succión
- Curva de retención
- Permeabilidad no saturada
- Tensiones efectivas
- Cambio de volumen
- Hinchamiento y colapso
- Resistencia al corte

El agua en el suelo

- Volumen del suelo
  - Sólido.
  - No sólido o de vacíos.
- Fases del suelo:
  - Sólida: Esqueleto sólido.
  - Líquida: Agua.
  - Gaseosa: Aire.

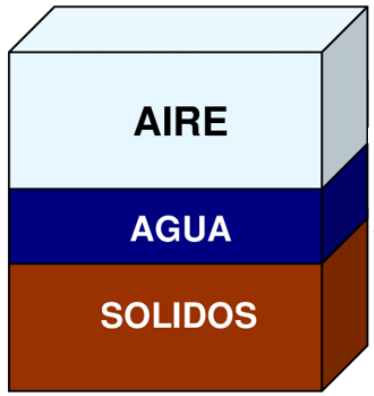


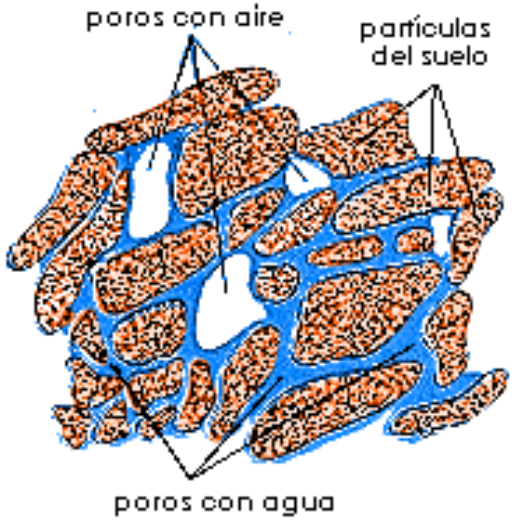


- Suelo
  - Seco: sin fase agua presente.
  - Saturado: sin fase gaseosa presente, pues la fase líquida ocupa todo el volumen de vacíos.
  - No saturado (también llamado suelo parcialmente saturado):
    - Las fases líquida y gaseosa se reparten en distintos % el volumen de vacíos.

Origen de los suelos no saturados

Teniendo en cuenta su origen, los suelos parcialmente saturados pueden ser naturales o artificiales. Respecto a los primeros se han descrito en la bibliografía una gran variedad de ejemplos tanto en suelos sedimentarios (eólicos, aluviales, coluviales, etc.), como en suelos residuales lateríticos y saprolíticos. Gran parte de los suelos sedimentario se han depositado en ambientes acuosos, quedando inicialmente saturados y posteriormente desecados debido a las circunstancias ambientales. Estos suelos abundan en lugares de clima árido y semi–árido, en que las estaciones son muy marcadas con periodos secos prolongados. Según diversos autores, estos lugares ocupan cerca del 30 % de la superficie de la Tierra. Respecto a los suelos residuales, su formación está asociada a los agentes de meteorización y el tipo de roca matriz. Los suelos tropicales lateríticos y saprolíticos, frecuentemente están en estado no saturado, debido a sus características de alta permeabilidad y las condiciones climáticas en las cuales se encuentran (Vaughan, 1985). Estos suelos son originados por la intensa y profunda descomposición de la roca matriz, bajo condiciones climáticas y biológicas que prevalecen en los trópicos. Por otra parte, dentro de los suelos artificiales se encuentran los suelos compactados extensamente utilizados en obras de tierra (presas, terraplenes, etc.), que debido a su naturaleza son suelos no saturados. Según Barden (1965) es razonable aceptar ciertas similitudes de comportamiento entre los suelos compactados y los suelos naturales desecados.





Perfil de suelos no saturados

- Grado de saturación

  Sr (%) = volumen fase líquida / volumen de vacíos

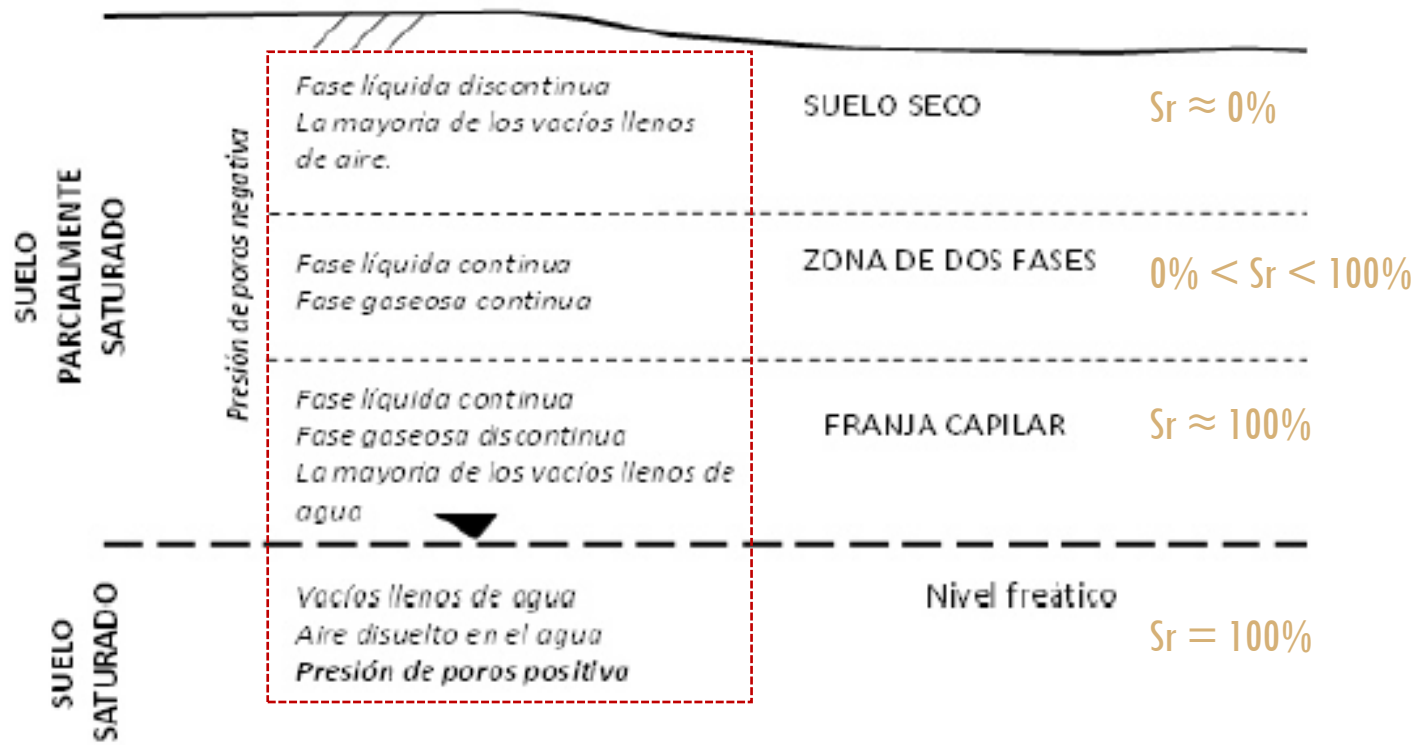


Figura 1. Zonas de suelo saturado y parcialmente saturado. Tomado de Fredlund, D.G, 2000.

Suelos no saturados

FASE SÓLIDA:

- Las partículas se disponen formando arreglos geométricos.
- Esta estructura influye en el estado de tensiones en los contactos entre partículas, el aire y el agua.
- Controla la componente capilar de la succión.
- Se transmiten tensiones normales y tangentes y fuerzas eléctricas de atracción y repulsión.
- Los minerales aparecen como partículas sólidas o disueltos (en la fase líquida).

FASE LÍQUIDA:

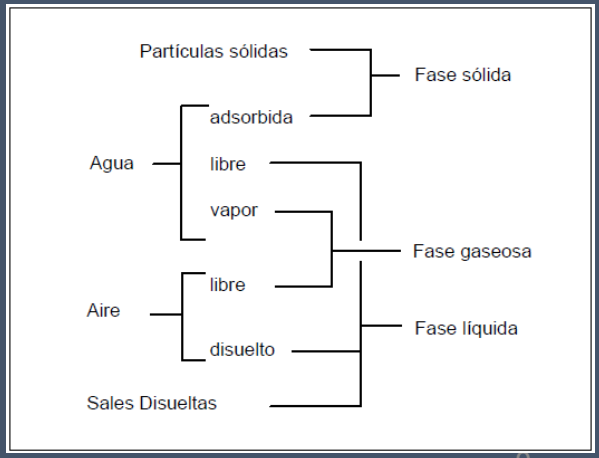
- Agua adsorbida en la partícula que no puede ser separada por acciones hidrodinámicas.
- Agua capilar, que puede moverse por la acción de las fuerzas capilares.
- Agua gravitacional, que puede drenar por gravedad.
- El agua capilar y el agua gravitacional forman una sola unidad que puede denominarse de *agua libre*.
- El agua libre tiene una presión (u_w) en la fase.
- El agua aparece libre, como vapor (en la fase gaseosa) o "adsorbida" (en la fase sólida).

FASE GASEOSA:

- El aire tiene una presión (u_a) en la fase.
- El aire aparece como libre, o disuelto (en la fase líquida).

INTERACCIÓN ENTRE LAS FASES

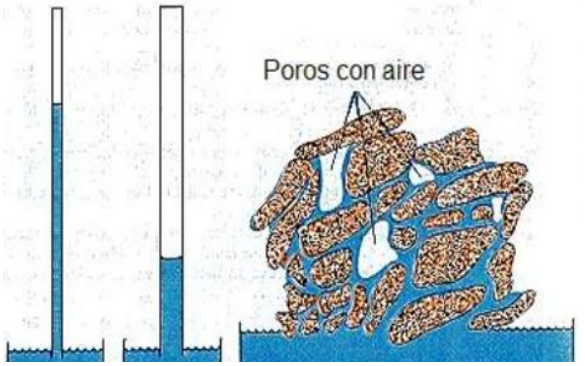
- Fenómenos de superficie.

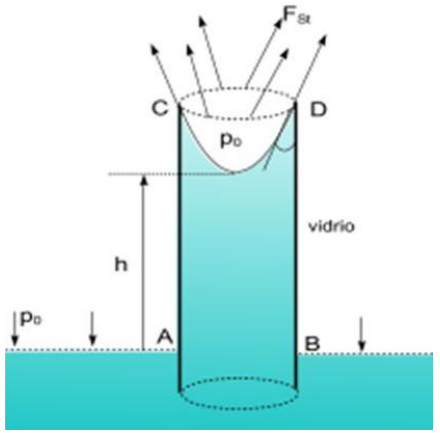


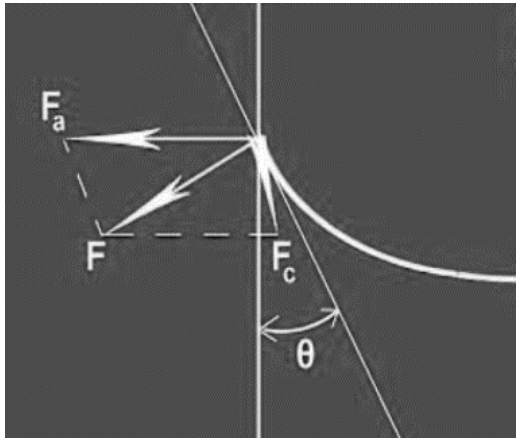
Capilaridad en suelos

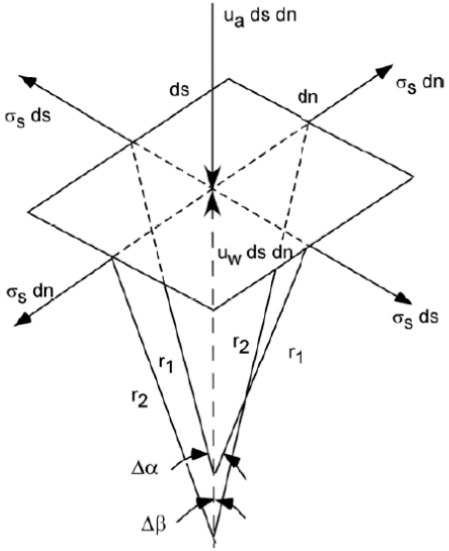
- En la interfaz de las 3 fases se combinan las fuerzas intermoleculares dando lugar a la tensión superficial σs.
- Las fuerzas superficiales Fs permiten el ascenso capilar del agua.
- La altura de equilibrio h depende del tamaño de cada capilar.
- Ángulo de mojado θ indica la afinidad entre el agua y superficie sólida.
- Se forma un menisco en la interfaz agua-aire.
- La ecuación de Laplace describe el equilibrio de presiones Uw y Ua con la tensión superficial σs (0.074 N/m a 15°C) y los radios de curvatura del menisco.

$$u_a - u_w = \sigma_s \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$







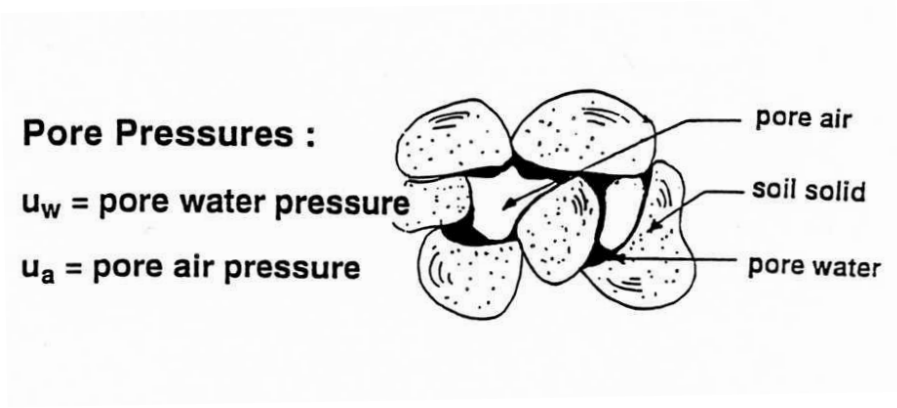


Concepto de succión

- **Succión Capilar:** Es la presión negativa de agua intersticial del suelo por efectos de superficie (capilares).
- **Succión matricial:** Es la presión negativa de agua intersticial, debido a los fenómenos de superficie y gravitatorios.
- **Succión osmótica:** Es la presión negativa de agua pura a la que habría que someter a la masa de agua del suelo, para estar en equilibrio a través de una membrana semipermeable.
- **Succión Total:** Es la suma de la succión matricial y la osmótica.
- El **flujo** no saturado se controla por los gradientes del potencial de agua total.

POTENCIAL DE AGUA TOTAL = GRAVITACIONAL + MATRICIAL + OSMÓTICO

Comportamiento **tensión – deformación:** depende de la succión matricial.



Succión Matricial (s) = Ua - Uw

Medición de la succión

- Por transferencia de vapor, asociada a la succión total (Ψ).
- Por transferencia de agua líquida, ligada a la succión matricial (s).



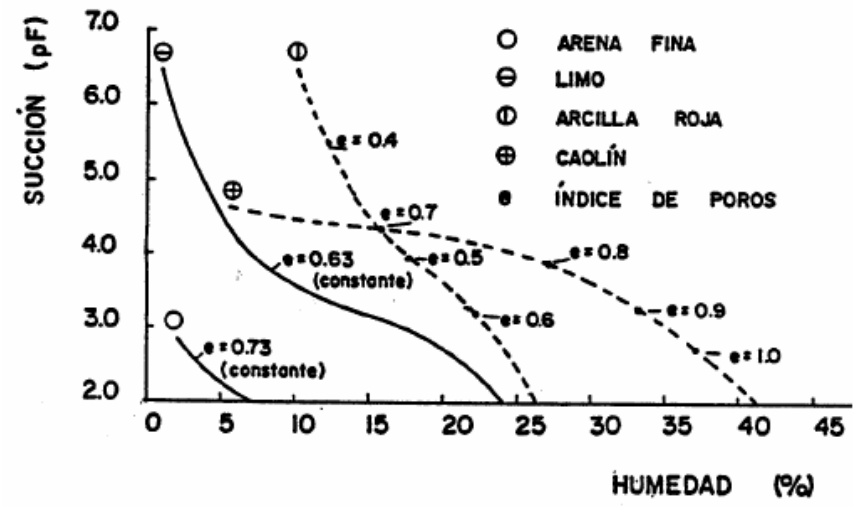


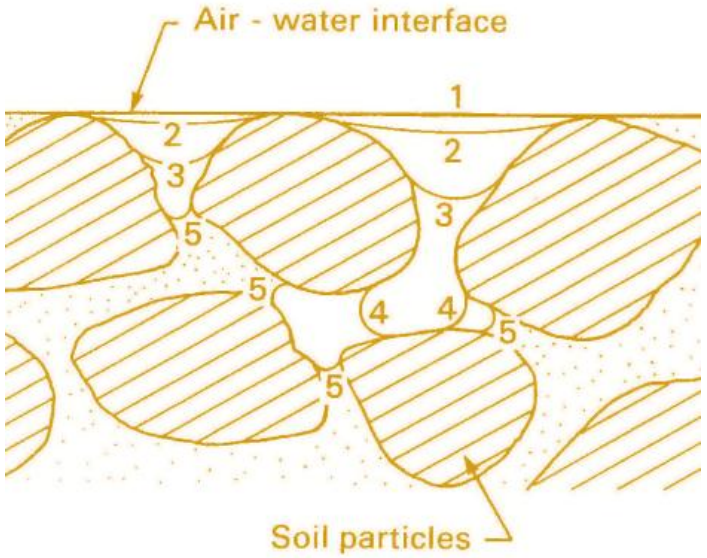
Tabla 2.2 Resumen de diferentes equipos y técnicas de medida de succión (Gens y Romero 2000).

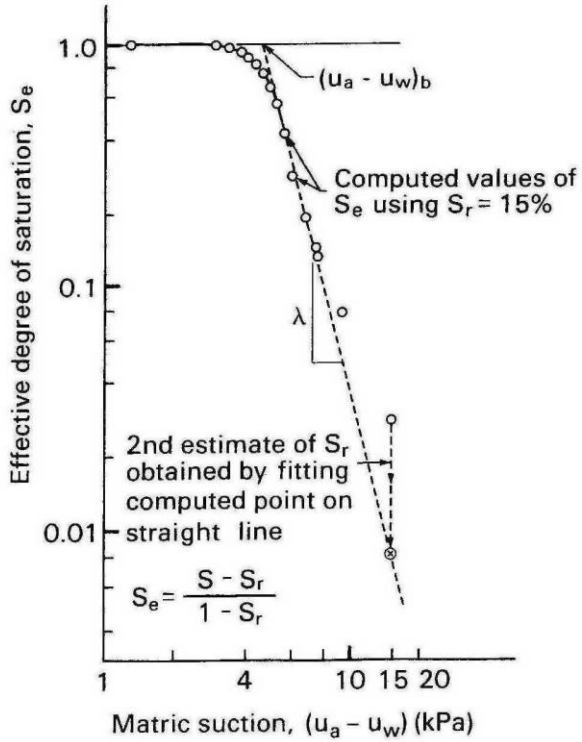
Equipo	Succión	Fenómeno medido	Rango (MPa)	Tiempo Equilibrado
Psicrómetro de Transistor SMI	Total Osmótica	Humedad relativa (diferencia Temp.)	0.3 – 25 70 equipos mejorados	Minutos
Psicrómetro de ter-mopares WESCOR	Total Osmótica	Humedad relativa (diferencia Temp.)	0.3 – 7	Minutos
Higrómetro capacidad/resistivo	Total	Humedad relativa (capacida/resisten.)	10 – 400	Minutos
Higrómetro de es-pejo (punto rocío)	Total	Humedad relativa (diferencia Temp.)	3 – 400	Minutos
Papel de filtro	Total (sin contacto) Matricial (contac.)	Contenido de humedad	0.4 – 40	mín. 7 días
Placa de succión	Matricial	Tracción de agua	0 – 0.08	horas/días
Placa de presión con membrana acetato	Matricial	Traslación de ejes	0 – 7	días/semanas
Tensiómetro	Matricial	Tracción de agua	0 – 0.08	Minutos
Tensiómetro Impe-rial College	Matricial Total (sin contacto)	Tracción de agua	0 – 2.1	Minutos
Celulosa porosa (bloque de yeso, fibra de vidrio)	Matricial	Resistencia eléctrica	0 – 1.5	días/semanas
Conductividad Térmica	Matricial	Conductividad térmica	0 – 1.5	días/semanas
Sensor TDR con cerámica (también se usa s/cerámica)	Matricial	Constante dieléctrica	0 – 0.3 (60% porosidad de cerámica)	horas/días
Técnica de Squeezing	Osmótica	Conductividad eléctrica	0 – 3	horas/días

Proceso de desaturación y entrada de aire

- La secuencia 1 a 5 muestra como es el proceso de desaturación y entrada de aire en el suelo.
- En 1 y 2 crece la succión pero sin caída en la saturación, por oposición de los meniscos.
- De 3 a 5 comienza la entrada de aire.
- La presión de entrada de aire implica un cambio drástico en la relación succión – saturación.
- Aumentando la succión se obtiene la curva completa, denominada curva característica.







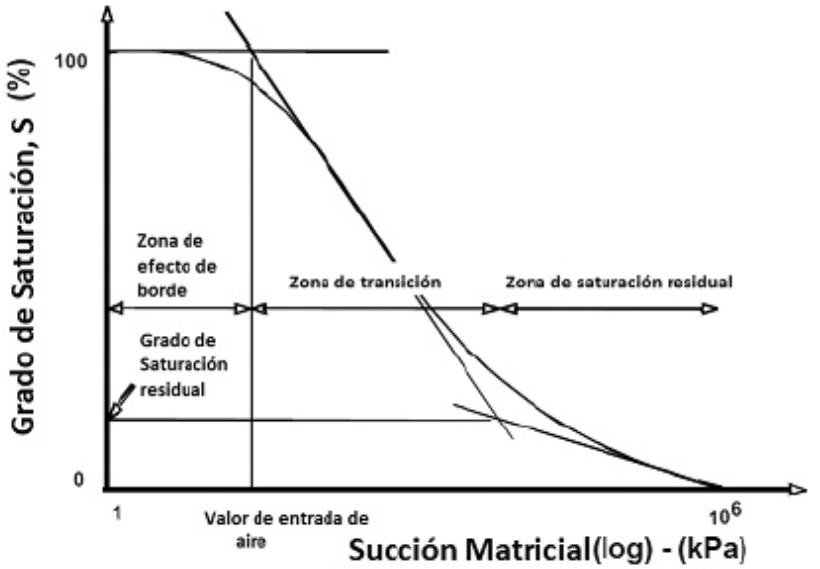
Curva de retención o característica

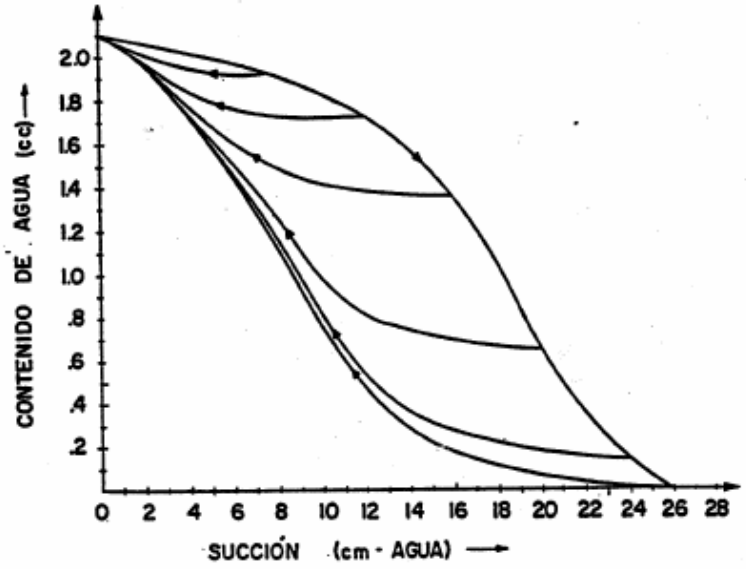
Zonas de la Curva Característica

- **Zona de borde:** en estado saturado y par succiones menores al valor de entrada de aire. Sólo fase agua.
- **Zona de transición:** las fases agua y aire se dividen el volumen de vacíos.
- **Zona de saturación residual:** Para secar el suelo mas allá de la saturación residual es necesario un aumento dramático de la succión.

Histéresis de la Curva Característica

- La relación unívoca se verifica sólo para trayectorias monótonas.
- Cuando hay ciclos de secado – humedecimiento se produce una **histéresis**, cuya magnitud dependerá del tipo de suelo.





Permeabilidad relativa (kr)

- En función del grado de saturación "efectivo" Se (considerando sólo los vacíos interconectados).
- Modelo de Van Genuchten $k_r = \sqrt{S_e}\left(1-\left(1-S_e^{1/\lambda}\right)^{\lambda}\right)^2$
- Modelo Cúbico: $kr = (Se)^3$

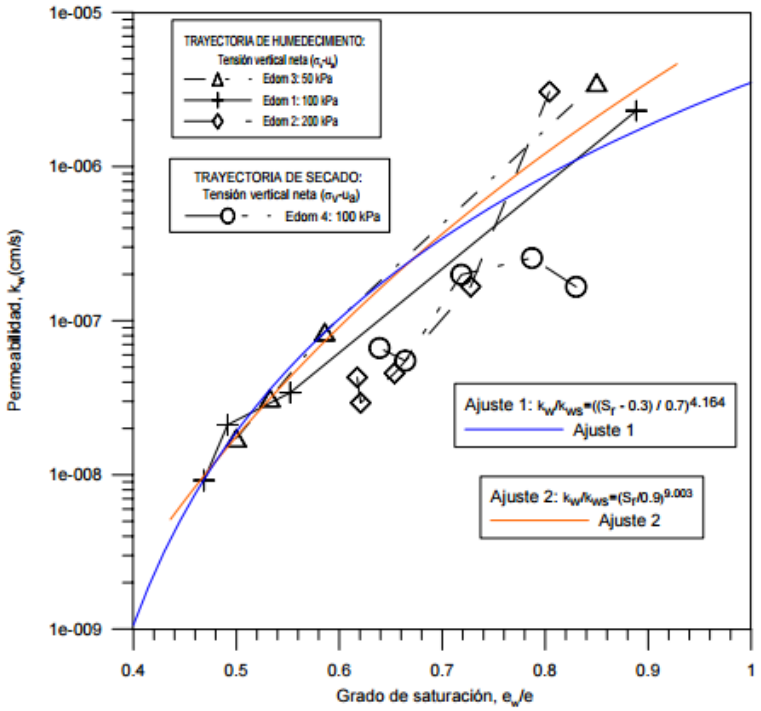


Figura 5.4: Permeabilidad en función del grado de saturación.

kr = knsat / ksat

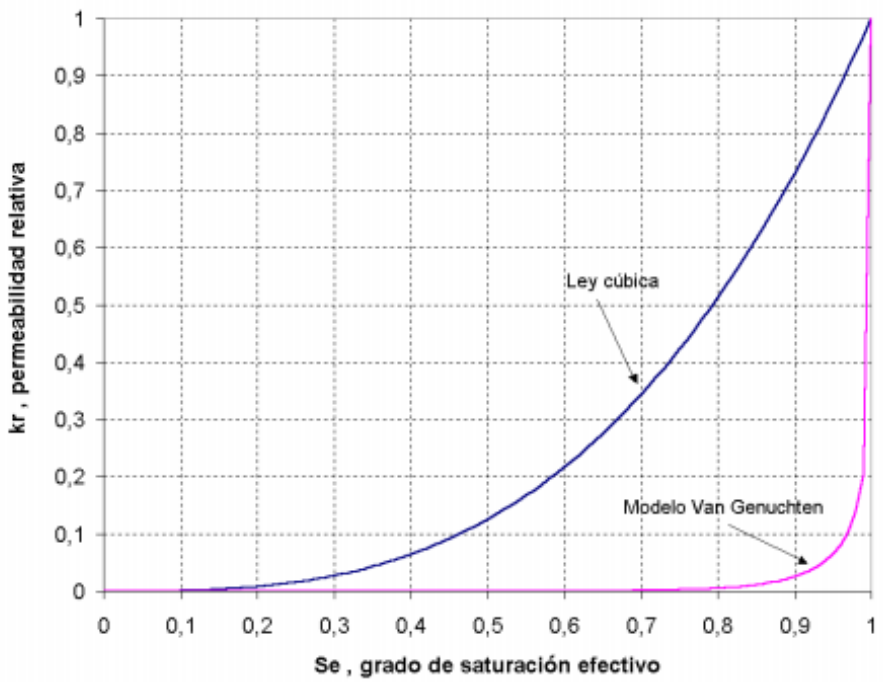


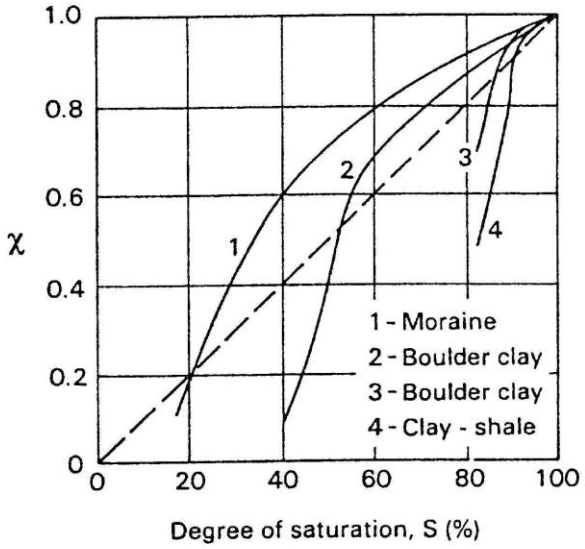
Figura 3.5 Permeabilidad relativa en función del grado de saturación. Modelo Van Genuchten (λ=0.2) y ley cúbica

Tensiones Efectivas en el dominio No Saturado

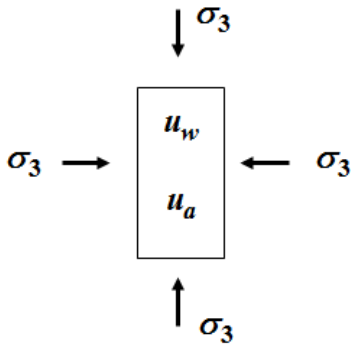
- El concepto permite aplicar los principios de la mecánica de sólidos a problemas geotécnicos mediante análisis teórico.
- Como extender el Principio ? $\tau = c' + \sigma' \tan\phi'$
- En suelos saturados (Terzaghi): $\sigma' = \sigma - u_w$
- En Suelos No Saturados (Bishop): $\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$

$$\chi = \left(\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right)^{-0.55}$$

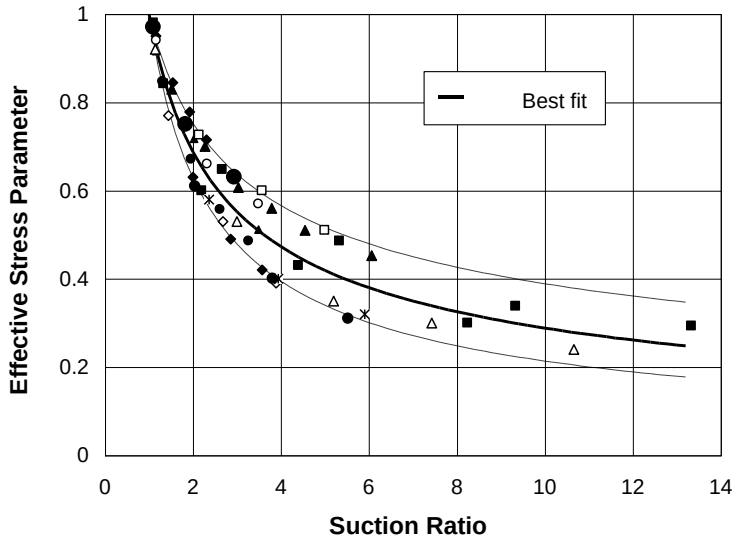
(b) representa el valor de la succión para el punto de entrada de aire



Depende del tipo de suelo

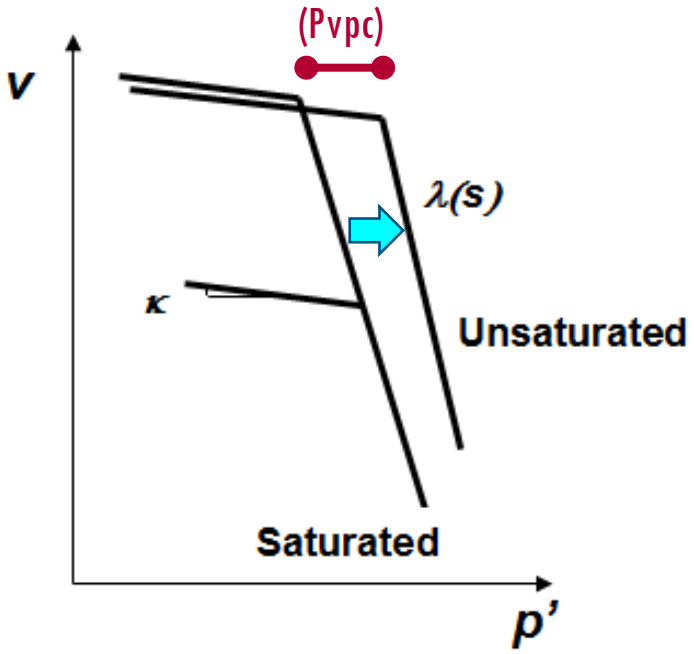


Khalili and Khabbaz (1998)



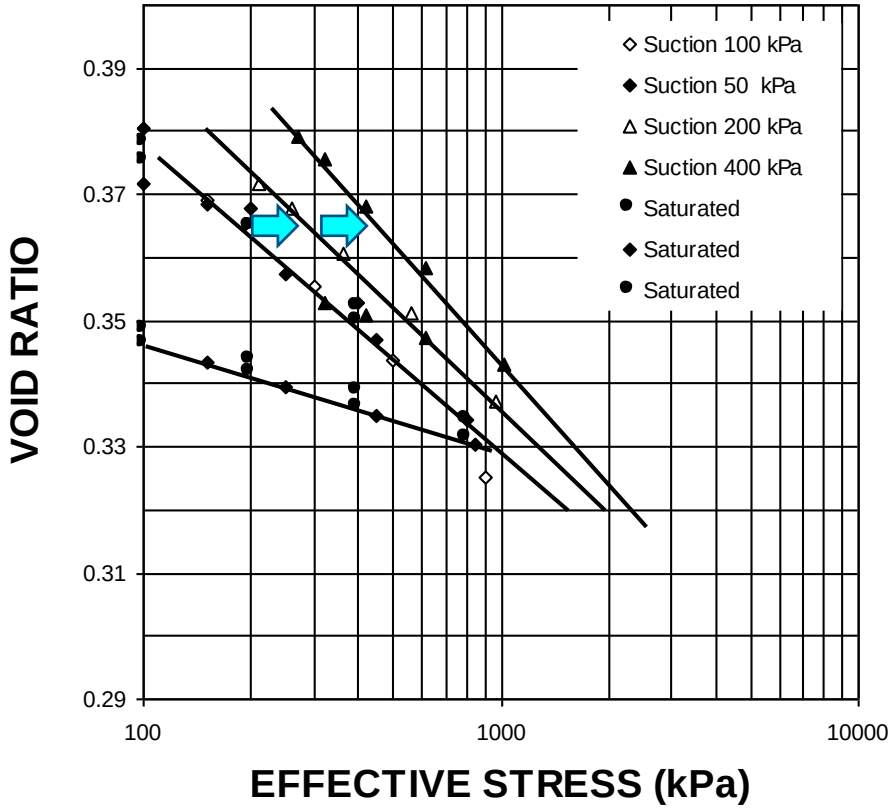
Comportamiento volumétrico

- Las pendientes de la línea de consolidación en carga y descarga son afectadas por el nivel de succión.
- Se produce un **endurecimiento por efecto del nivel de succión**.
  - Aumenta la tensión virtual de preconsolidación (Pvpc).
- Se acentúa el **colapso por humedecimiento**.



$$v = N(s) - \lambda(s) \ln p'$$

$$p' = (p - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$



Khalili and Khabbaz (1998)

Colapso e hinchamiento

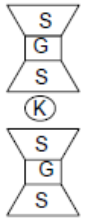
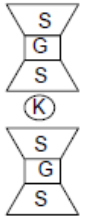
Colapso

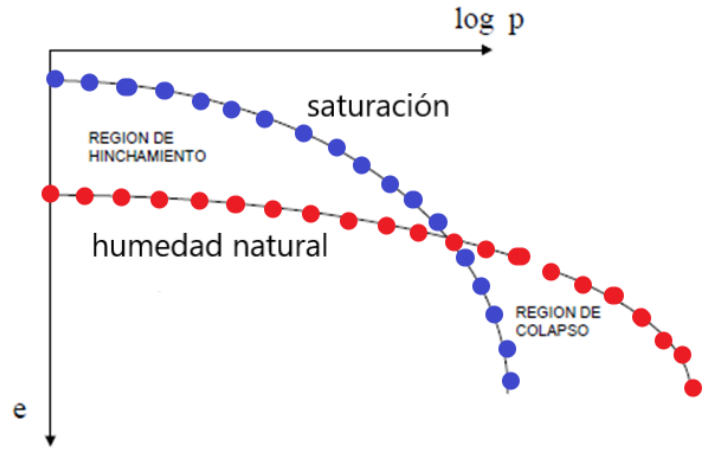
- Se produce por humedecimiento bajo carga en suelos con estructura abierta, porosa.

Hinchamiento

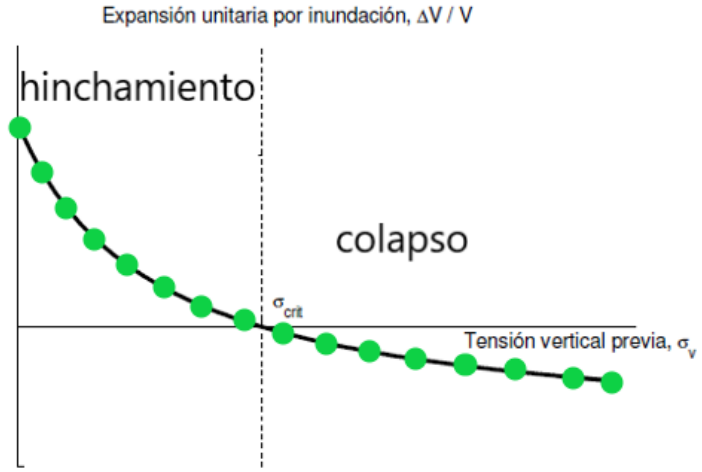
Se produce por humedecimiento bajo cargas bajas o nulas en suelos con minerales expansivos.

Tabla 2.4 Propiedades de los minerales arcillosos expansivos (Lambe, 1959).

Propiedades	MINERAL Caolinita	Illita	Montmorilonita
Esquemas de la estructura G = lámina de Gibbsita S = lámina de Silicato K = ión de potasio			
Tamaño de las partículas	d= 0.3 a 3 µm e = 1/3 a 1/10 d	d= 0.1 a 2 µm e = 1/10 d	d= 0.1 a 1 µm e = 1/10 d
Superficie específica	5 – 30	65 – 100	600 – 800
Capacidad de intercambio catiónico por 100g de arcilla	3 – 15	10 – 40	80 – 150
Forma de la partícula	Aplanada	Aplanada	Aplanada
Expansión máximo para una presión de 0.1 t/p^2	despreciable	350	1500
Expansión máxima para una presión de 0.2 t/p^2	despreciable	150	350



Expansión y colapso para un mismo suelo (Jennings y Kenight, 1975).



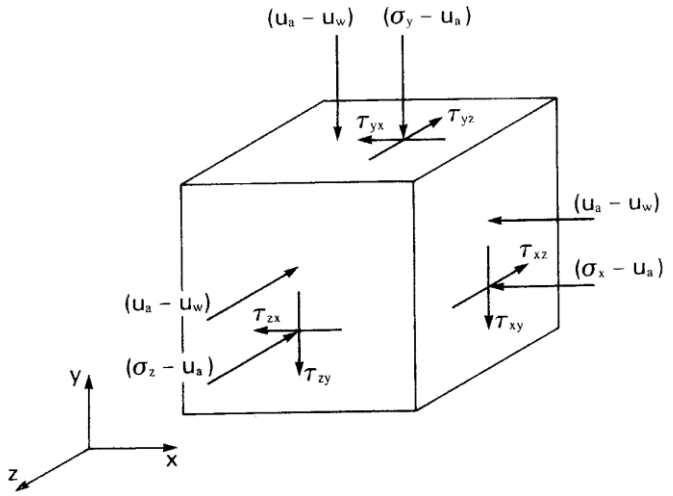
Curva de hinchamiento bajo carga

Variables de Estado de Tensión

- El comportamiento mecánico de los suelos es controlado por las mismas variables de tensión que controlan el equilibrio del suelo.
- La ecuación de tensión efectiva debe ser <u>independiente</u> de las propiedades del material.
- Fredlund and Morgenstern (1977) proponen dos variables:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

$(\sigma - u_a)$ $(u_a - u_w)$



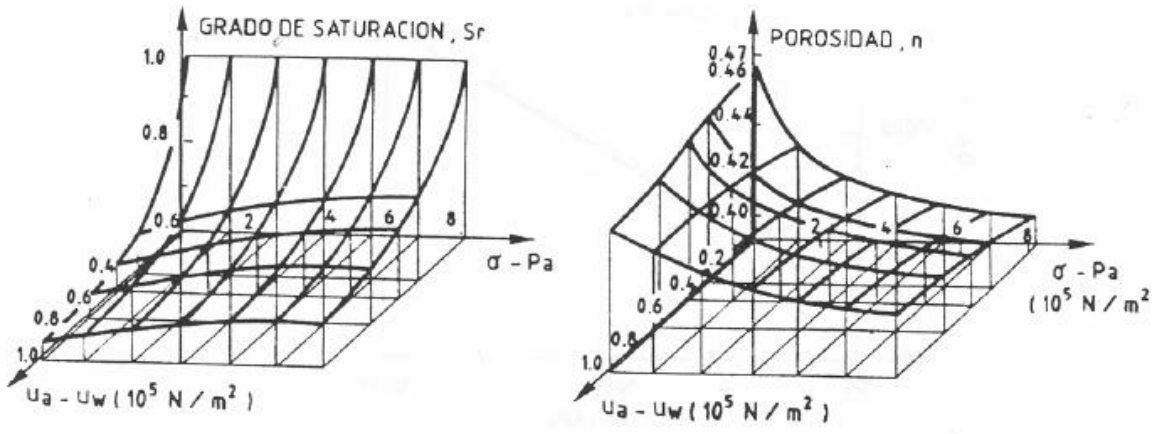
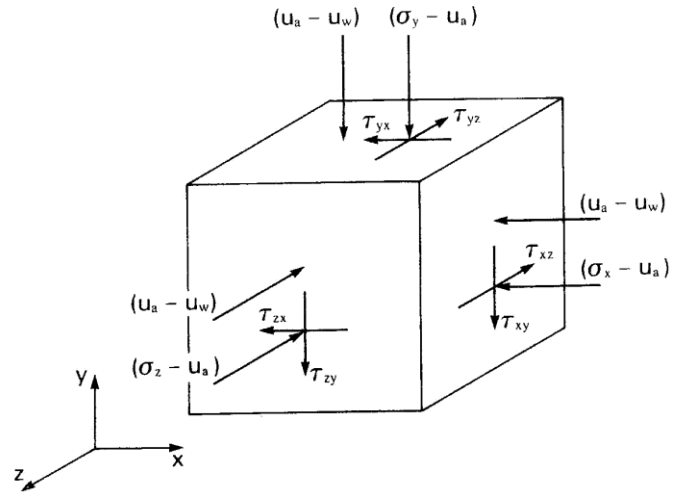


Figura 2.16 Superficies de estado para *e* y *Sr* (Matyas y Radakrishna, 1968).

Variables de Estado de Tensión

- El comportamiento mecánico de los suelos es controlado por las mismas variables de tensión que controlan el equilibrio del suelo.
- La ecuación de tensión efectiva debe ser <u>independiente</u> de las propiedades del material.
- Fredlund and Morgenstern (1977) proponen dos variables de estado.
- Otros autores rechazan las *2 variables de estado*, y buscan continuar con el concepto de tensión efectiva tradicional.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$



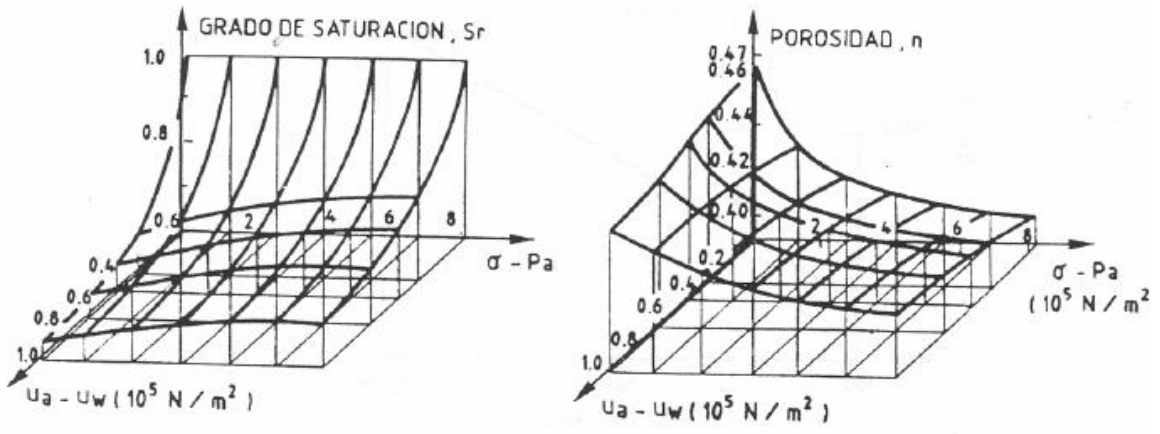


Figura 2.16 Superficies de estado para *e* y *Sr* (Matyas y Radakrishna, 1968).

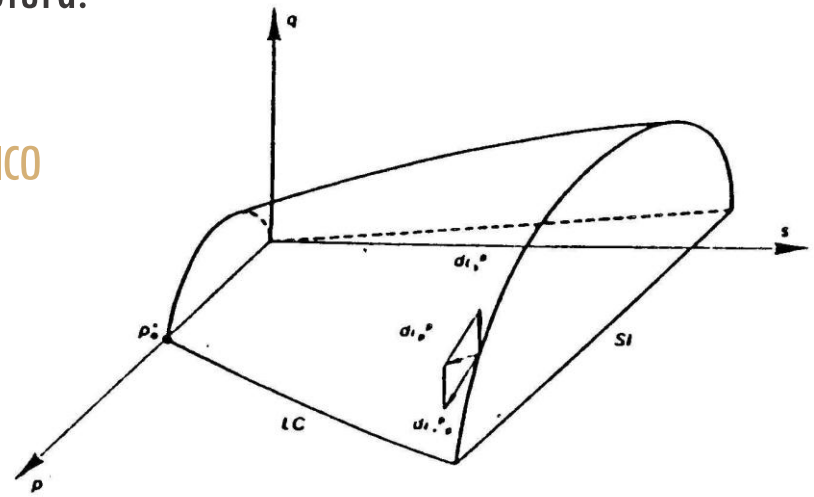
Resistencia al corte

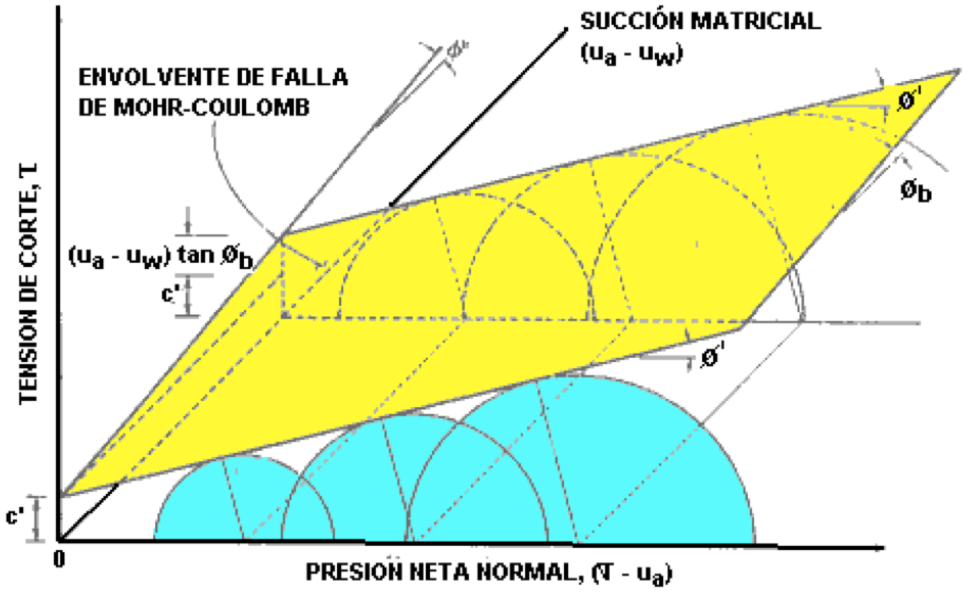
- Frendlund (1978) propuso la expresión clásica para la resistencia al corte de un suelo no saturado, como una extensión de la expresión de Terzaghi:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi_b$$

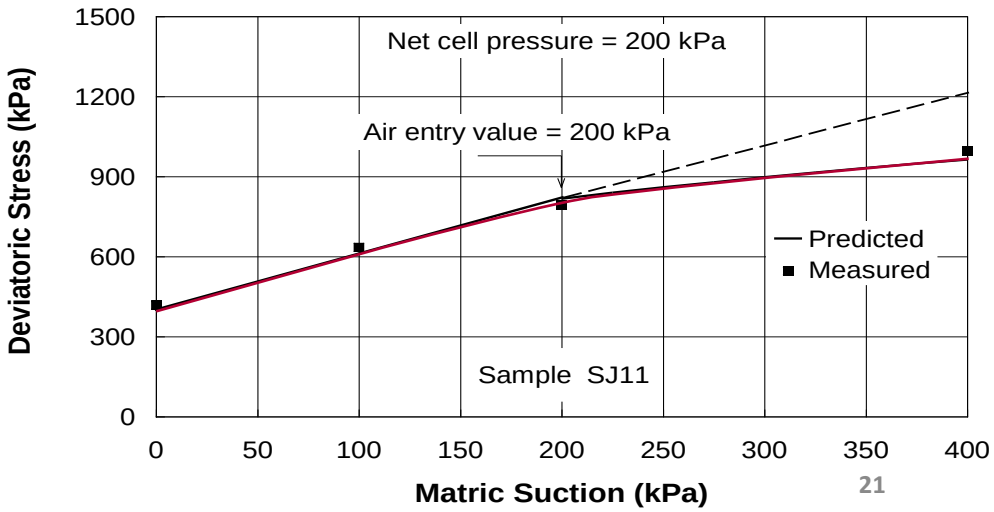
- El ángulo ϕ_b propuesto no es constante, decayendo su valor con el aumento de la succión.
- Incluido en algunos modelos constitutivos avanzados modificando la envolvente de rotura.

MODELO ELASTOPLASTICO
BARCELONA BBM
(Alonso et al 1990)





ENVOLVENTE DE FALLA EN EXTENSION DE CRITERIO DE MOHR - COULOMB EN SUELOS NO SATURADOS



Equipos con Control de Succión

- Celda Edométrica.
- Caja de Corte Directo.
- Celda Triaxial.

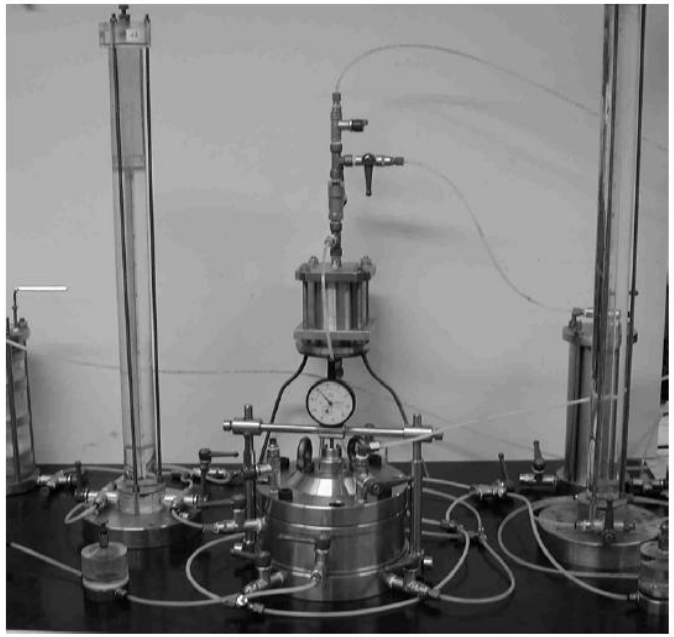


Figura 2.10b Célula edométrica con control de succión total (Ψ) (humedad relativa) y succión matricial (u_a-u_w) (traslación de ejes) (Barrera, 2002).



Comentarios finales

La Mecánica de los Suelos No Saturados:

- Constituye una **nueva y moderna rama** de la Mecánica de Suelos clásica (orientada a suelos secos o saturados).
- Busca basarse y **extender los conceptos** fundamentales de la Mecánica de Suelos clásica al dominio no saturado.
- También **incorpora nuevos paradigmas** y formas de abordar los problemas.
- En algunos temas como la resistencia al corte, **todavía no hay consenso** absoluto y diferentes propuestas son estudiadas.
- Actualmente se encuentra **en plena expansión**, y cuenta con foros propios.