

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Propiedades de los Suelos



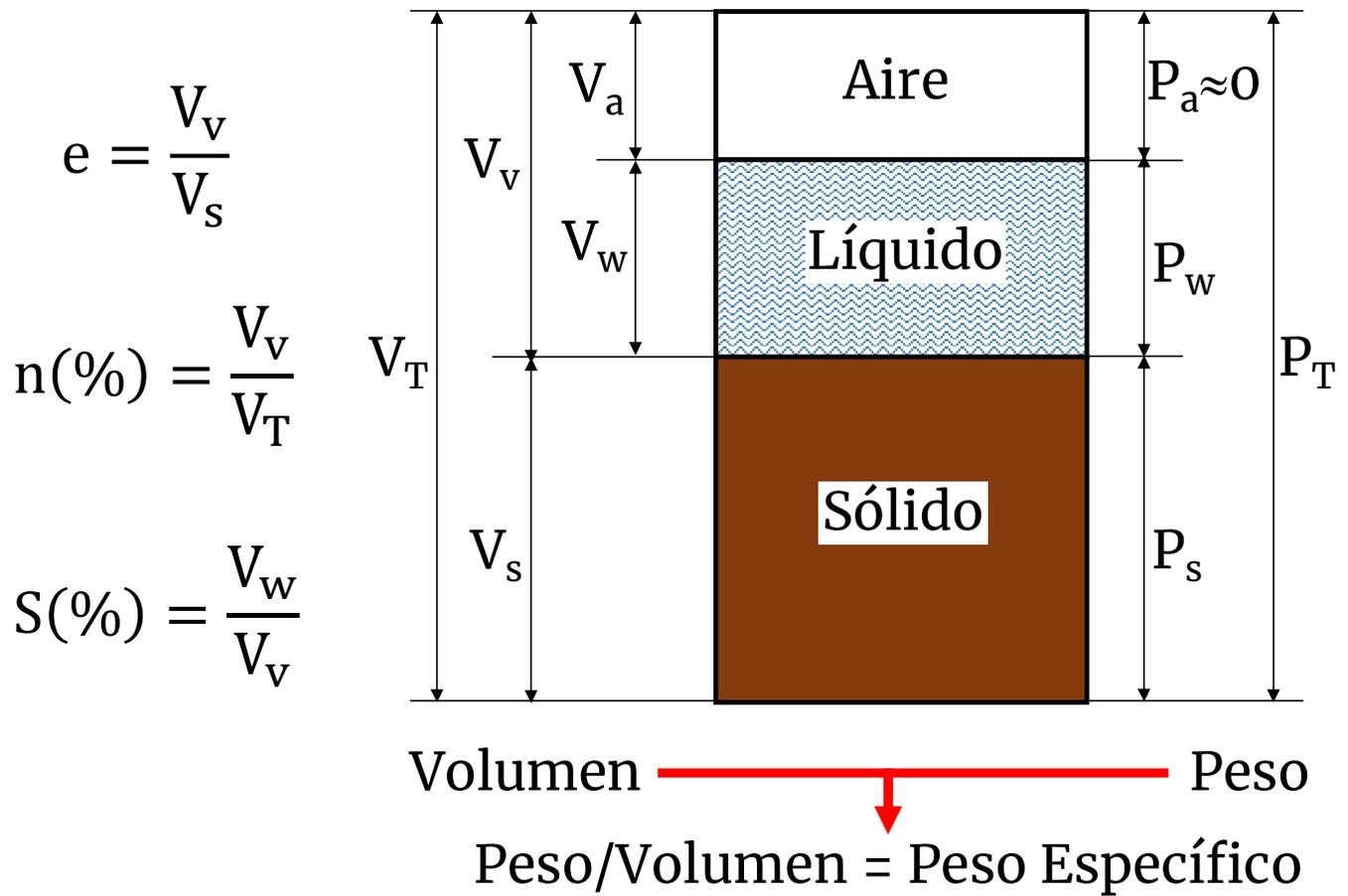
FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Dr. Ing. Leonardo Behak
Instituto de Estructuras y Transporte

PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO



$$w(\%) = \frac{P_w}{P_s}$$

$$\gamma = \frac{P_T}{V_T}$$

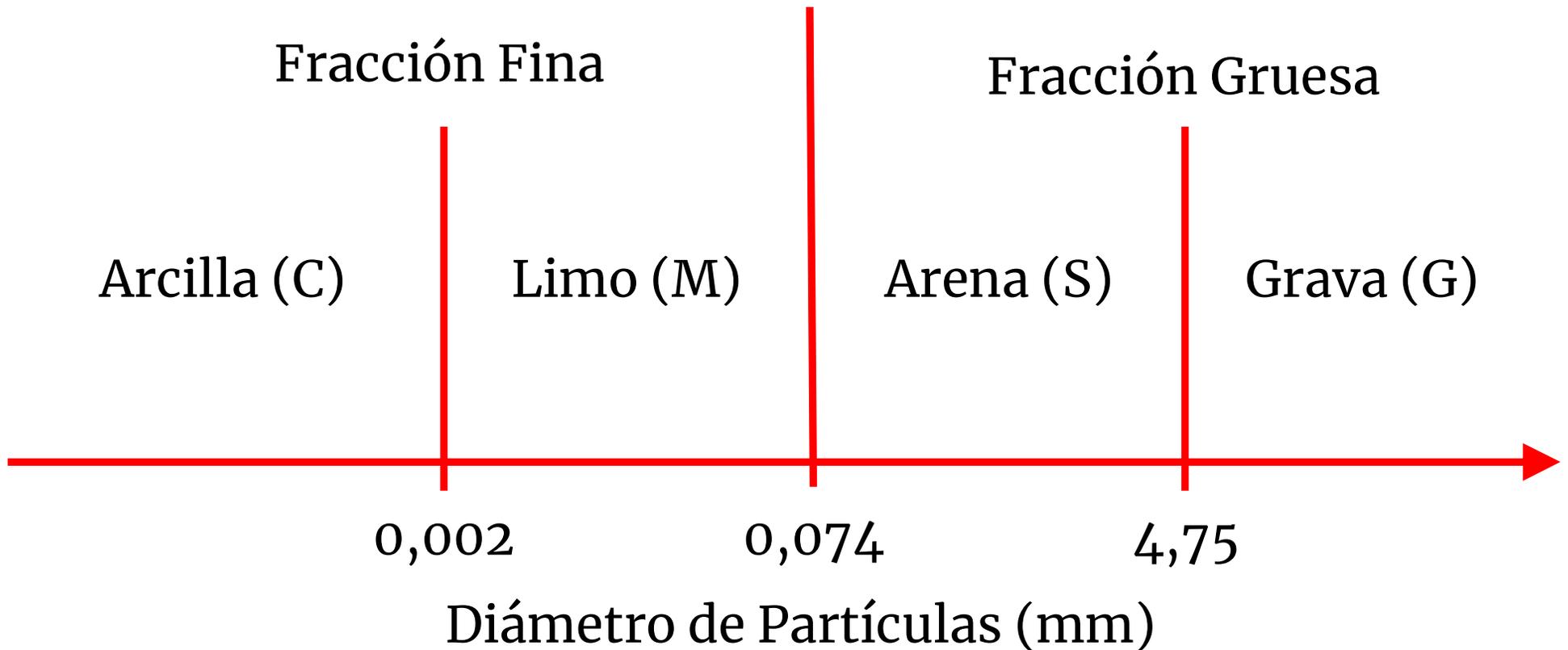
$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_T}$$

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s}$$

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS

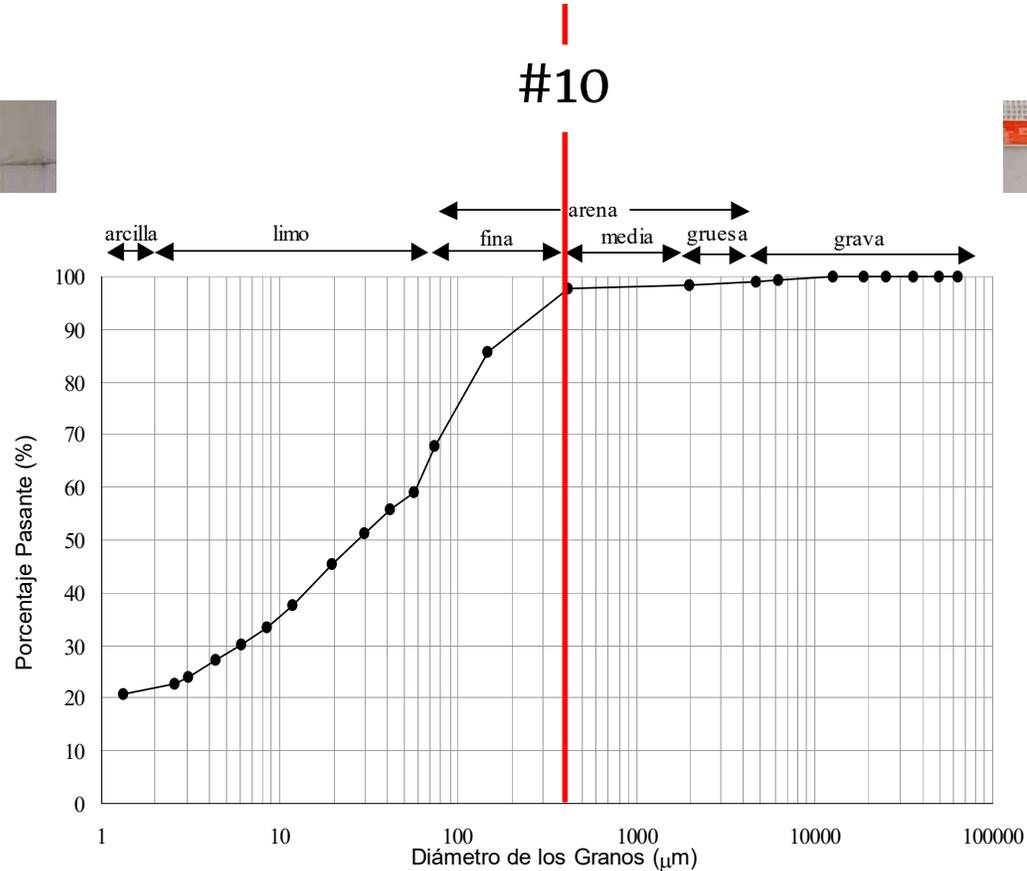
Norma ASTM D2487



GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS

Análisis Granulométrico (ASTM D422)

Sedimentación

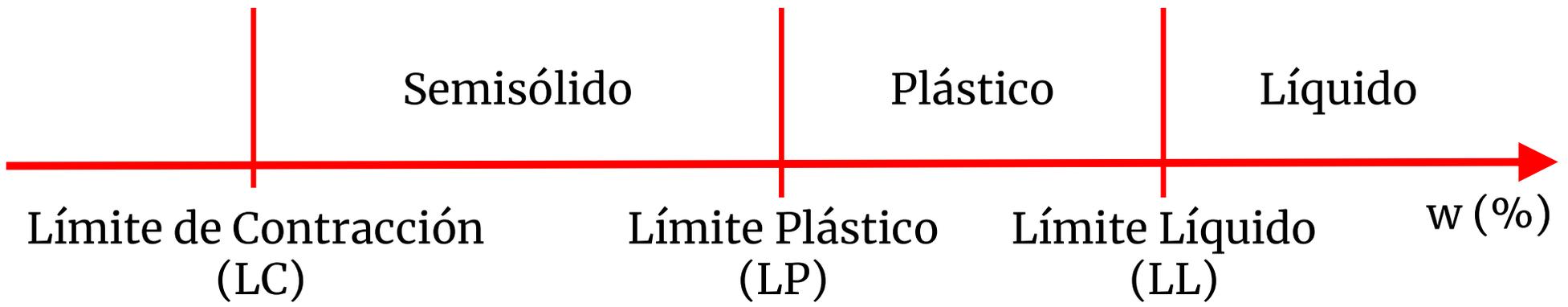


Tamizado



PROPIEDADES PLÁSTICAS DE LOS FINOS

Límites de Consistencia (ASTM D4318)

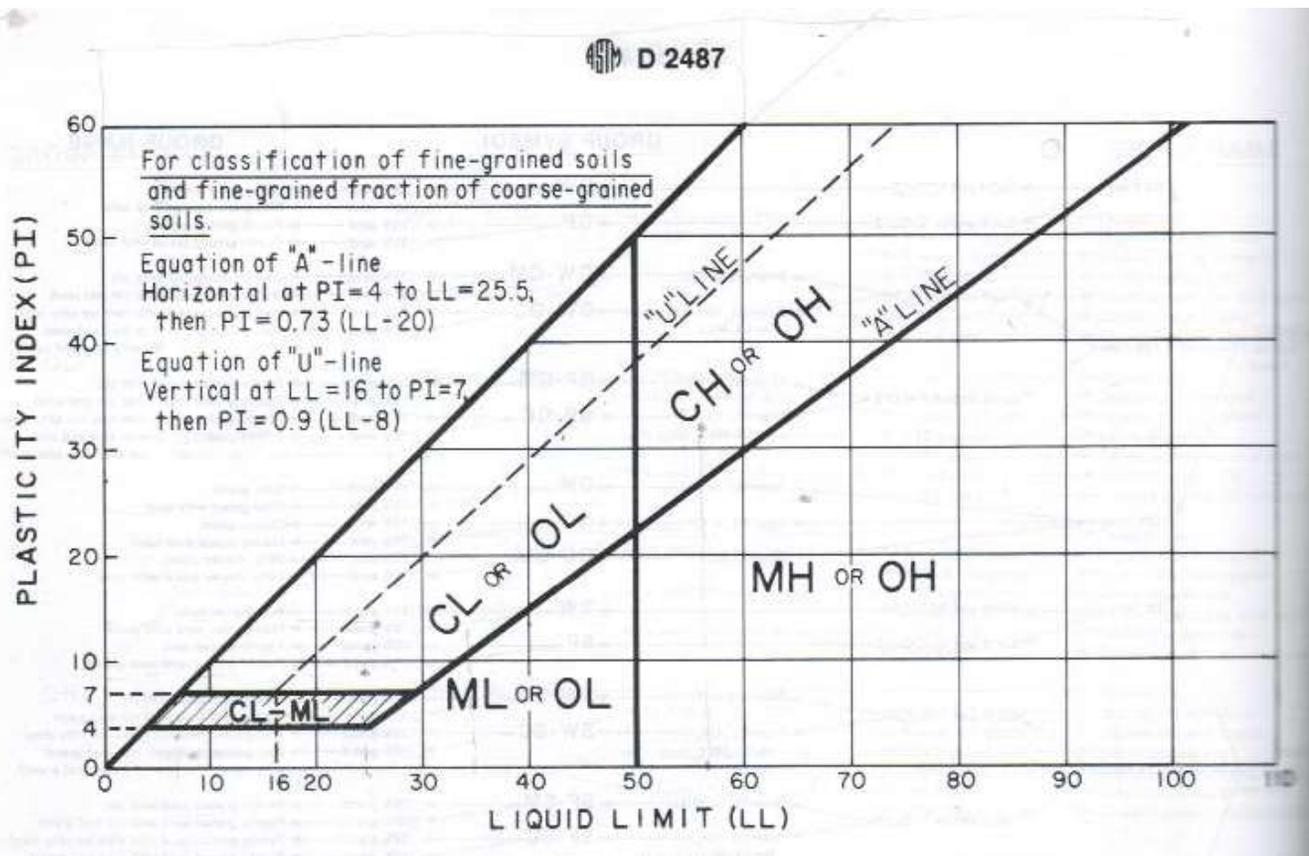


Índice Plástico
(IP)



PROPIEDADES PLÁSTICAS DE LOS FINOS

Carta de Plasticidad

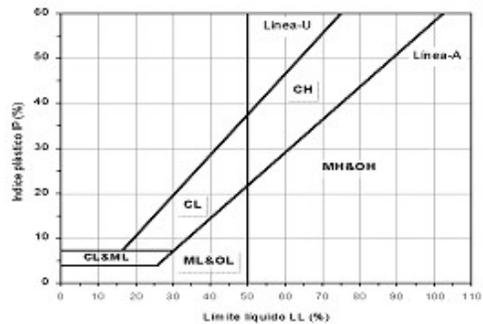


L: Baja Compresibilidad
H: Alta Compresibilidad

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (ASTM D2487)

SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla N° 200		SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla N° 200		División Mayor
Las partículas de 0,075 mm de diámetro (malla N°200) son aproximadamente las más pequeñas visibles a simple vista.				
LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido mayor de 50%		LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido menor de 50%		
Suelos altamente orgánicos	OH Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad	CH Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas tanicas	MH Limos inorgánicos, limos micáceos o diamocáceos	
Pt	OL Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	CL Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas con grava, arenosas o limosas	ML Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	
				SC Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla
				SM Arenas limosas, mezclas de arena y limo
				SP Arenas mal graduadas, arena con grava, poco o nada de finos
				SW Arenas bien graduadas, arena con grava, poco o nada de finos
				GC Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla
				GM Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo
				GP Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos
				GW Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos
				Gravas con finos en cantidad apreciable
				Gravas limpias poco o nada de finos
				Arenas limpias poco o nada de finos
				Arenas con finos en cantidad apreciable
				Para clasificación usual puede usarse 1/4 in como equivalente a la abertura malla N° 4
				Más de la mitad de la muestra gruesa pasa por la malla N° 4
				Más de la mitad de la muestra gruesa es retenida por la malla N° 4
				ARENAS
				GRAVAS
				Criterio de clasificación en laboratorio
				Coeficiente de uniformidad C_u : mayor de 4 Coeficiente de curvatura C_c : entre 1 y 3
				NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW
				Límites abajo de la "Línea A" y con IP menor que 4
				Límites arriba de la "Línea A" y con IP mayor que 7
				Límites arriba de la "Línea A" y con IP menor que 4
				Límites arriba de la "Línea A" y con IP mayor que 7
				Coeficiente de uniformidad C_u : mayor de 6 Coeficiente de curvatura C_c : entre 1 y 3
				NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA SW
				Límites abajo de la "Línea A" y con IP menor que 4
				Límites arriba de la "Línea A" y con IP mayor que 7
				Límites arriba de la "Línea A" y con IP menor que 4
				Límites arriba de la "Línea A" y con IP mayor que 7
				Ariba de "Línea A" y con IP entre 4 y 7
				son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.



CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Sistema de Clasificación AASHTO (ASTM D3282)

Clasificación de suelos y mezclas de agregados para la Construcción Vial

Recommended Practice AASHTO M 145-82 (Specifications - Parte 1, 1986)

Clasificación General	Materiales Granulares (35% o menos pasa el tamiz N°200)							Materiales limo-arcillosos (más de 35% pasa el tamiz N°200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5

Análisis de tamizado (% pasa)

	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7
2.00 mm (# N°10)	50 máx	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.425 mm (# N°40)	30 máx	50 máx	51 min	----	----	----	----	----	----	----	----
0.075 mm (# N°200)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 min	36 min	36 min	36 min

Características de fracción pasa # N°40

	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7
Límite Líquido (LL)	----	----	40 máx	41 min	41 min						
Índice Plástico (IP)	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 min	11 min	10 máx	10 máx	11 min	11 min	11 min

Materiales constituyentes significativos	Fragmentos de piedra, grava y arena	Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general como subrasante	Excelente a buena						Regular a pobre			

El IP del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL menos 30. El IP del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30 (ver **Gráfico** siguiente).
La casilla A-3 antes de la A-2 es debido al proceso de eliminación de izquierda a derecha. No indica superioridad de A-3 sobre A-2.

ARCILLAS

FILOSILICATOS

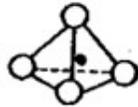
Silicatos de Aluminio
Hidratados

Silicatos de Magnesio
Hidratados

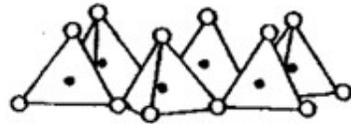
Fe^{2+} ; Fe^{3+} ; Ca^{2+} ; Na^{+} ; K^{+} ; H^{+} , etc.

UNIDADES ESTRUCTURALES BÁSICAS DE ARCILLAS

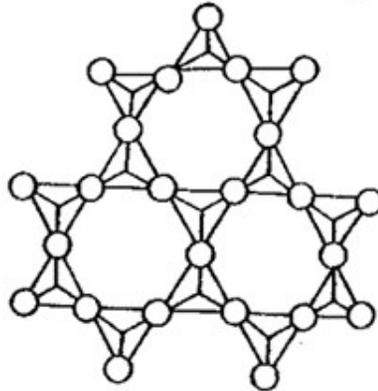
TETRAEDRO DE SiO_4



- ÁTOMOS DE OXIGENO
- ÁTOMOS DE SILICIO

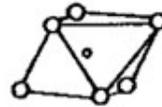


CAPA DE TETRAEDROS DE SiO_4

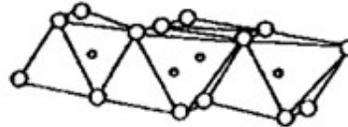


Sílice

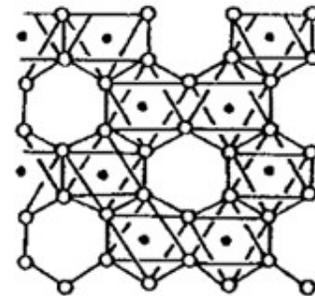
OCTAEDRO DE AlO_6



- ÁTOMOS DE OXIGENO
- ÁTOMOS DE ALUMINIO



CAPA DE TETRAEDROS DE Al



Gibsita

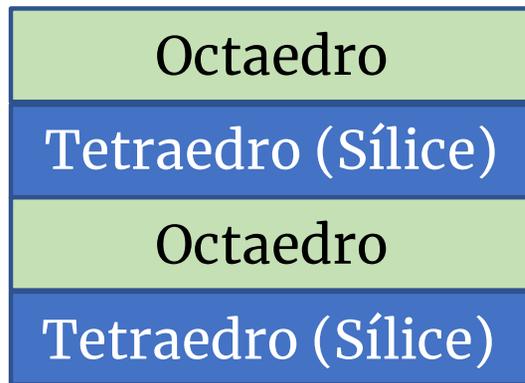
Octaedro de
Magnesio



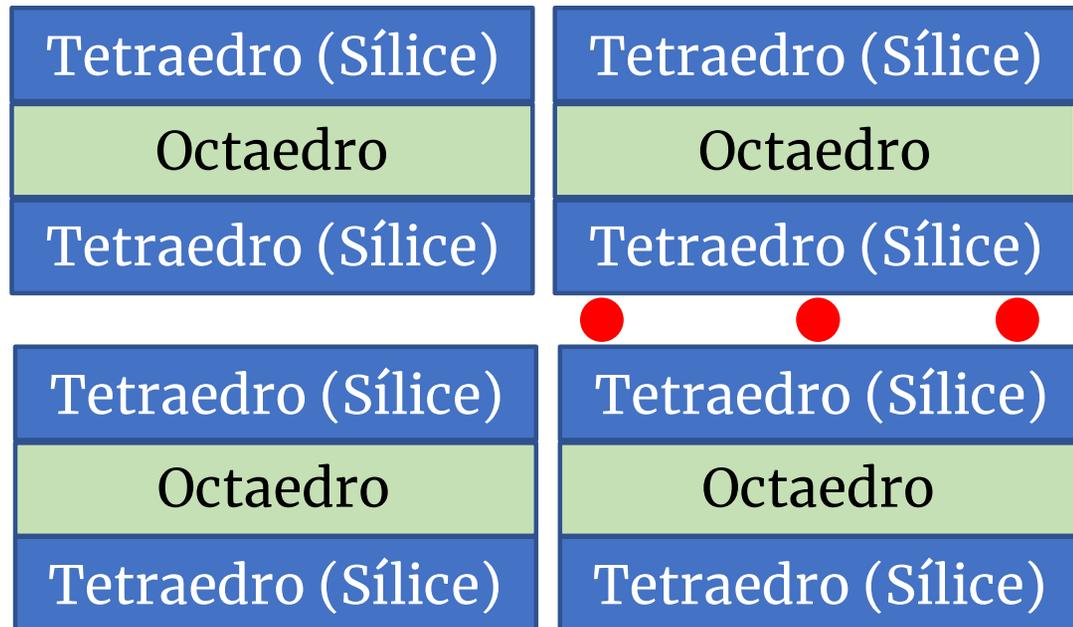
Brucita

ESTRUCTURAS DE ARCILLAS

Estructura 1:1



Estructura 2:1



Espacio Intercapa

CLASIFICACIÓN DE MINERALES ARCILLOSO

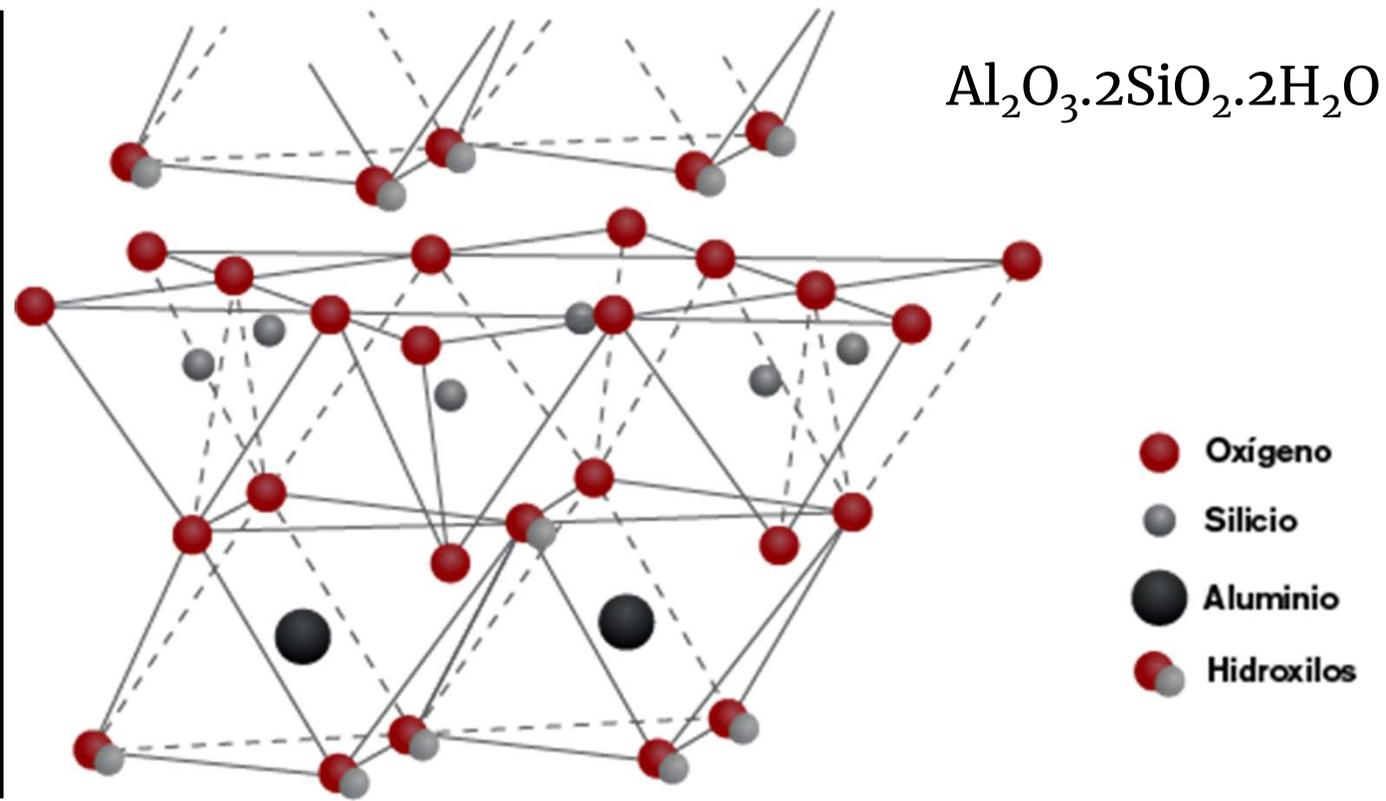
AIPEA (1976)

Capa	Material Intercapa	Grupo	Subgrupo	Especie
1:1	Ninguna	Caolinita Serpentina	Di	Caolinita
2:1	Catión Hidratado	Esmectita	Di	Montmorillonita
	Catión Hidratado	Vermiculita	Di, Tri	Vermiculita
	Catión Hidratado	Mica	Tri	Illita
	Láminas de Hidróxidos	Clorita	Di, Tri	

Di: Dioctaédricas; Tri: Trioctaédricas

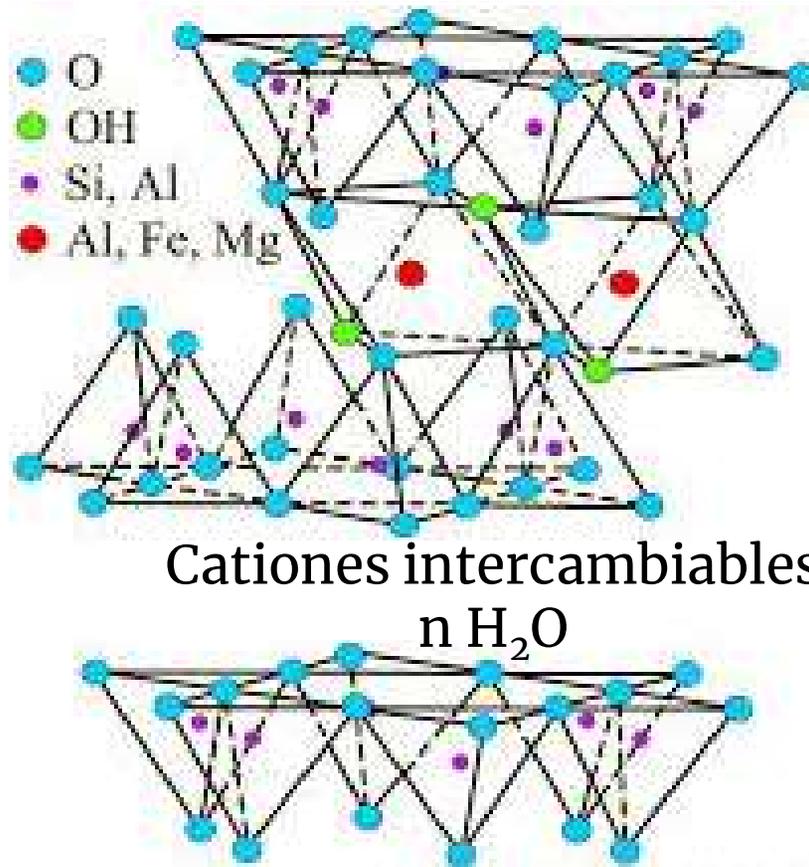
GRUPO CAOLINITA (1:1)

d: Espacio Basal
(mínima distancia entre dos planos
basales)



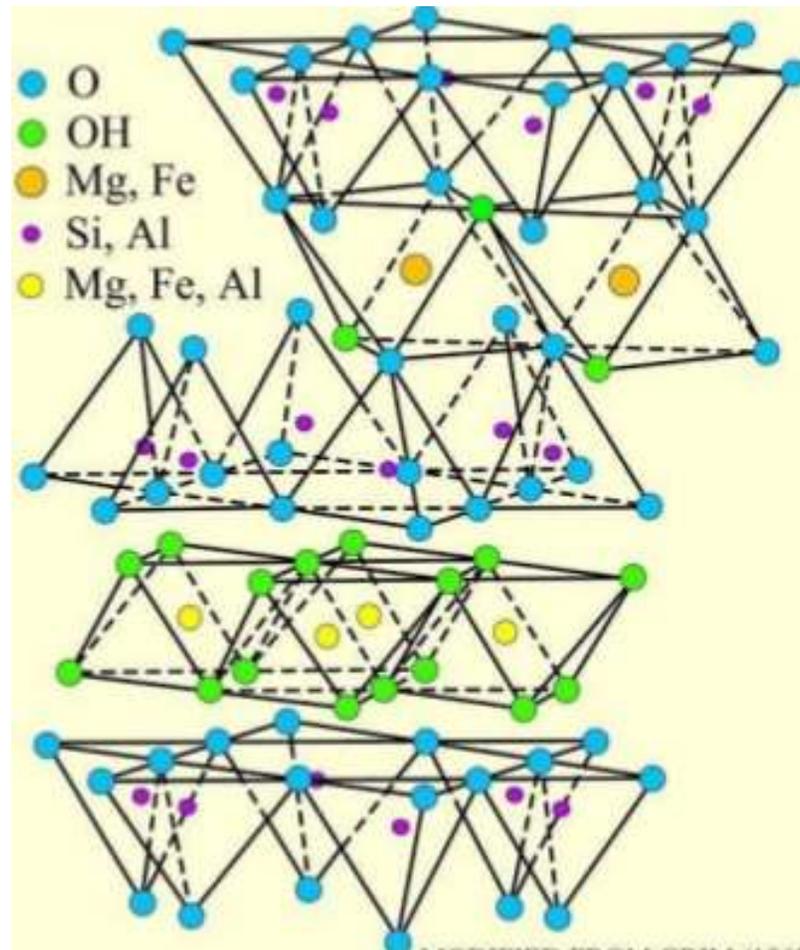
Estructura Estable en presencia de agua

GRUPO ESMECTITA (2:1) (MONTMORILLONITA)



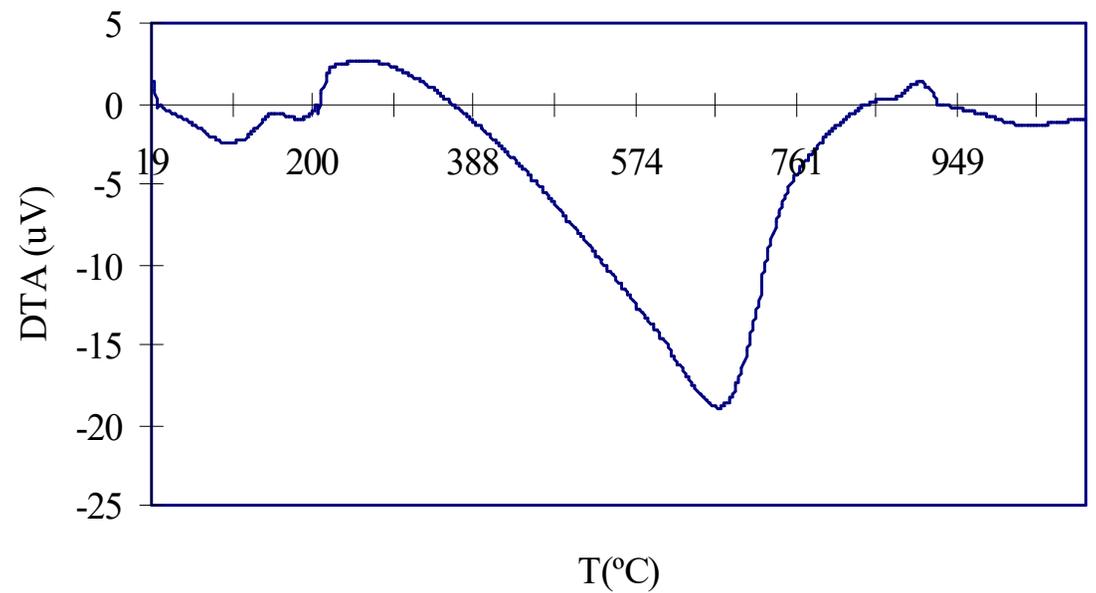
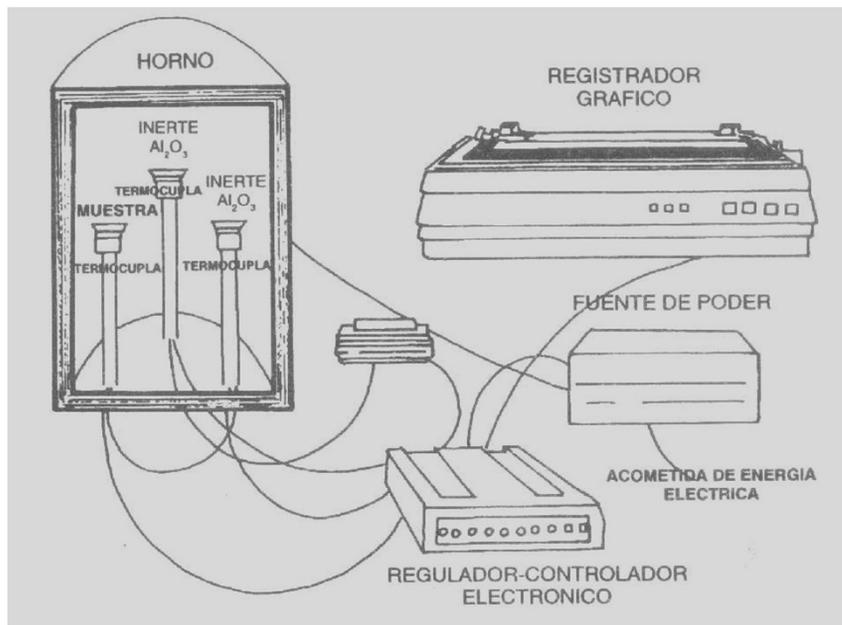
Expansividad estructural por absorción de agua o moléculas polares

GRUPO CLORITA (2:1)



TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE ARCILLAS

Análisis Térmico Diferencial (ATD)

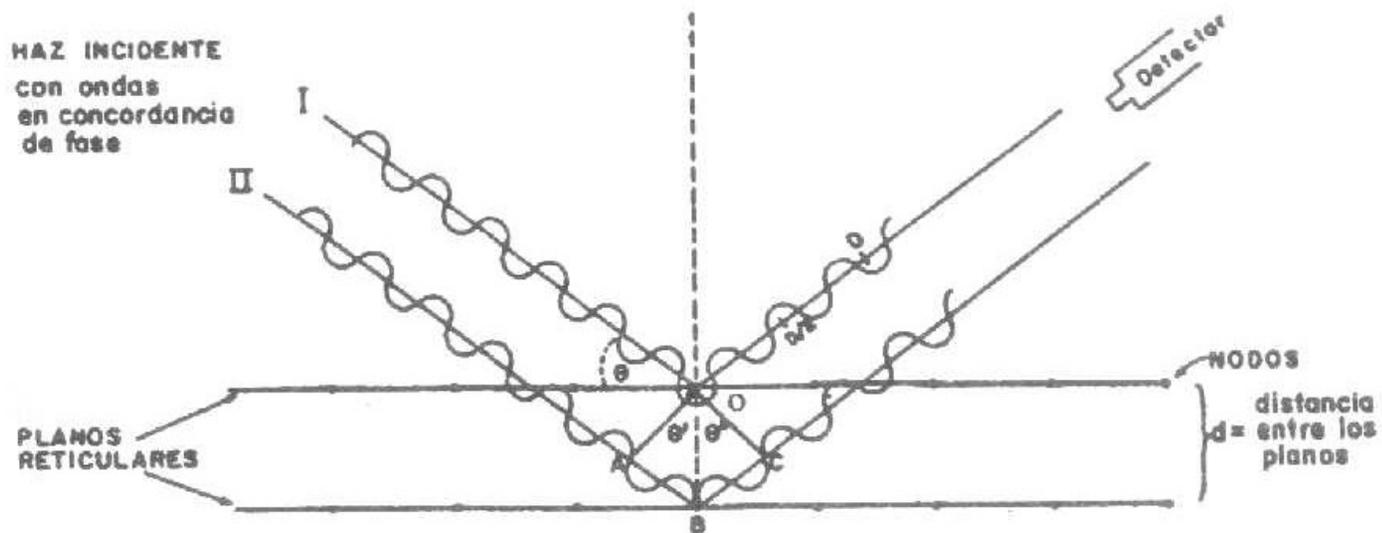


ATD Esmeclita

TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE ARCILLAS

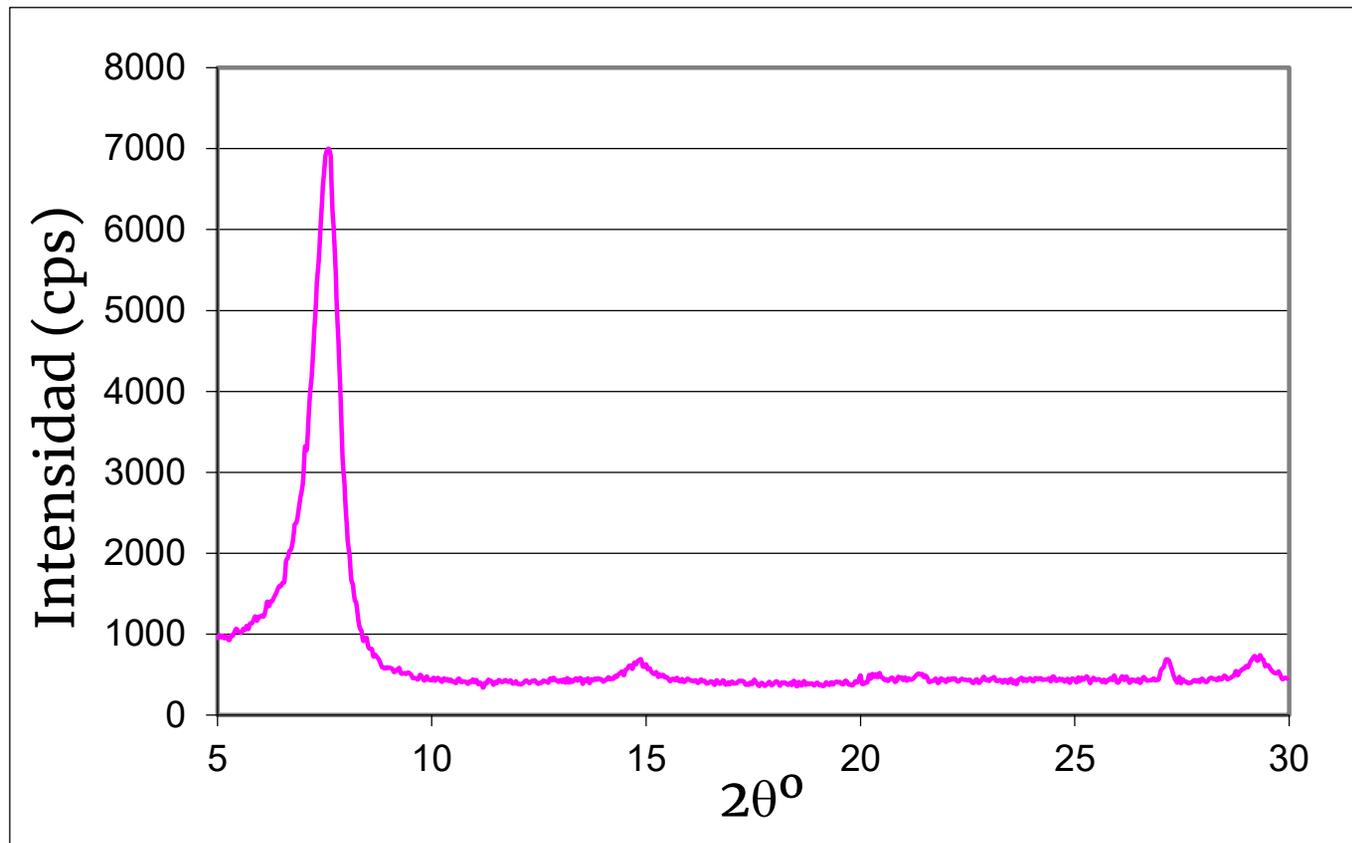
Difracción de Rayos X (DRX)

Ley de Bragg $n\lambda = 2d\sin\theta$



TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE ARCILLAS

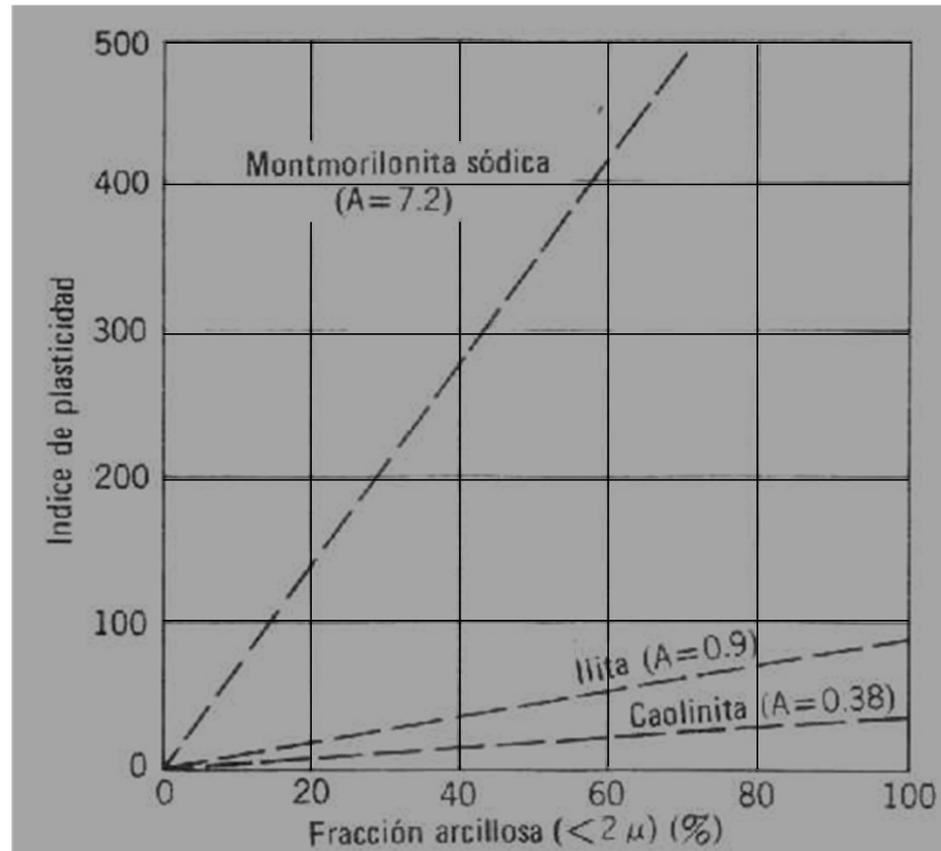
DRX Esmectita



TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE ARCILLAS

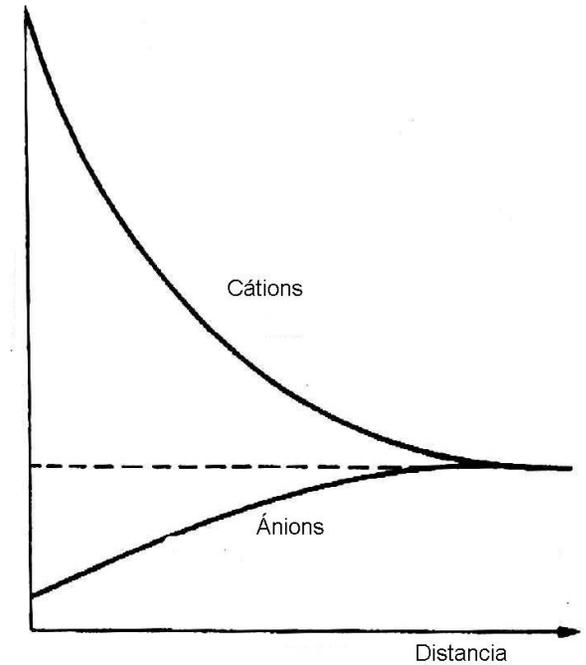
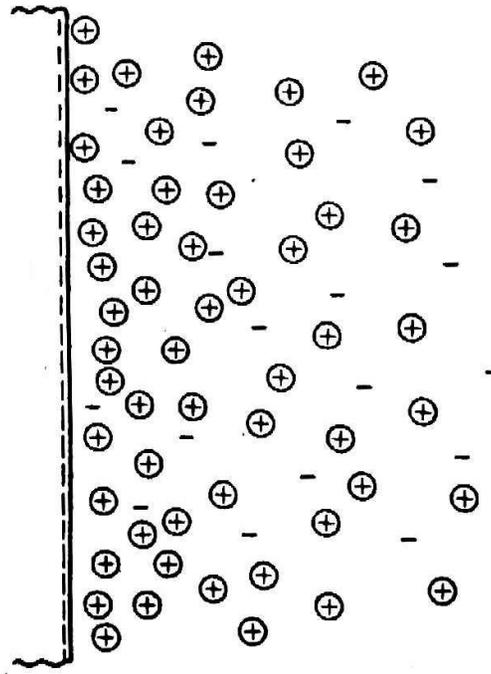
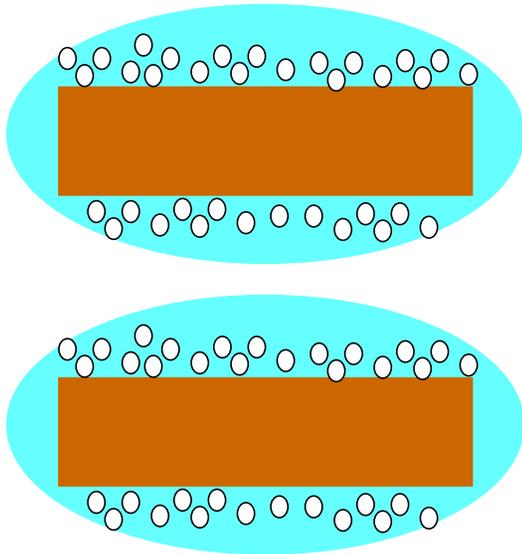
Actividad Coloidal (Skempton, 1953)

$$A = \frac{IP}{\% \text{ Pasa } 2\mu\text{m}}$$



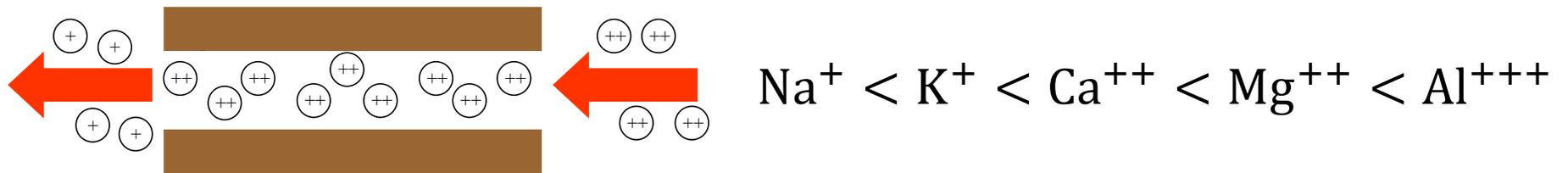
PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS

Doble Capa Difusa



PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)



Función de mineral arcilloso

	Caolinita	Illita	Clorita	Esmectita	Vermiculita
CIC (cmol/kg)	3-15	10-40	10-40	80-150	100-150
Sup. Esp. (m ² /g)	10-20	65-100	65-100	≈ 840	≈ 840

Ensayo de Azul de Metileno

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Facilidad con que fluidos fluyen por intersticios del suelo

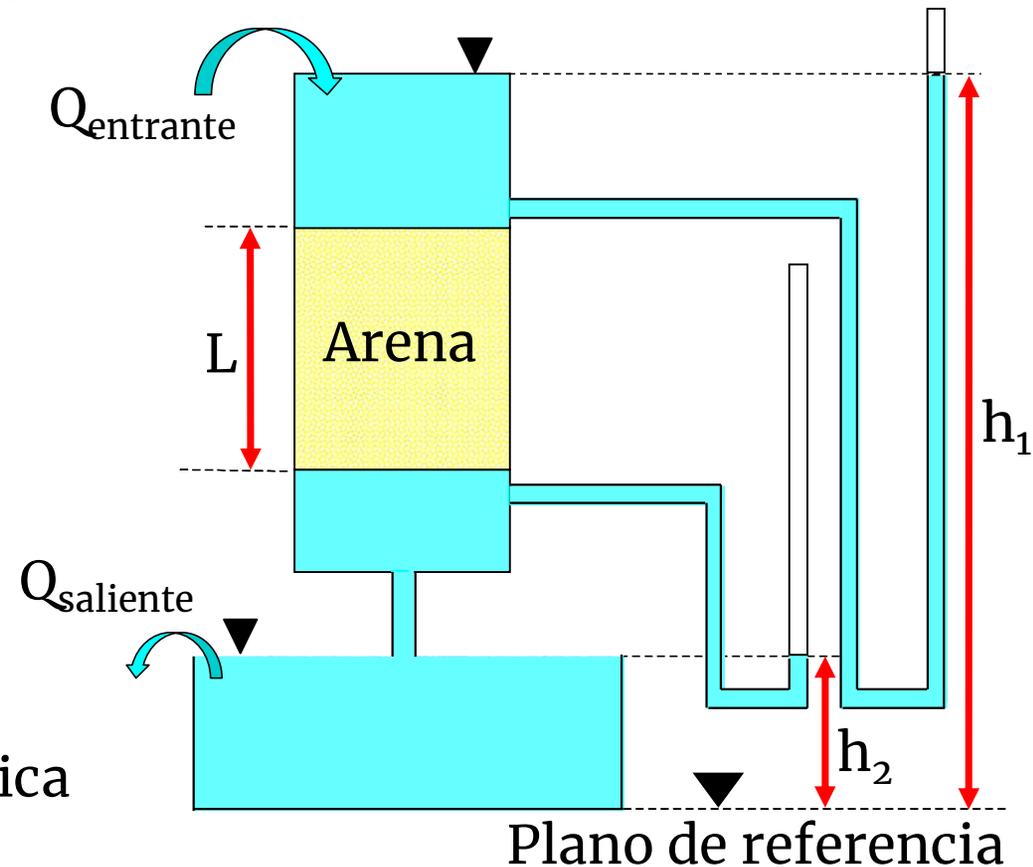
Ley de Darcy (1856)

Flujo laminar, estacionario
y unidireccional

$$Q = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A = k \cdot i \cdot A$$

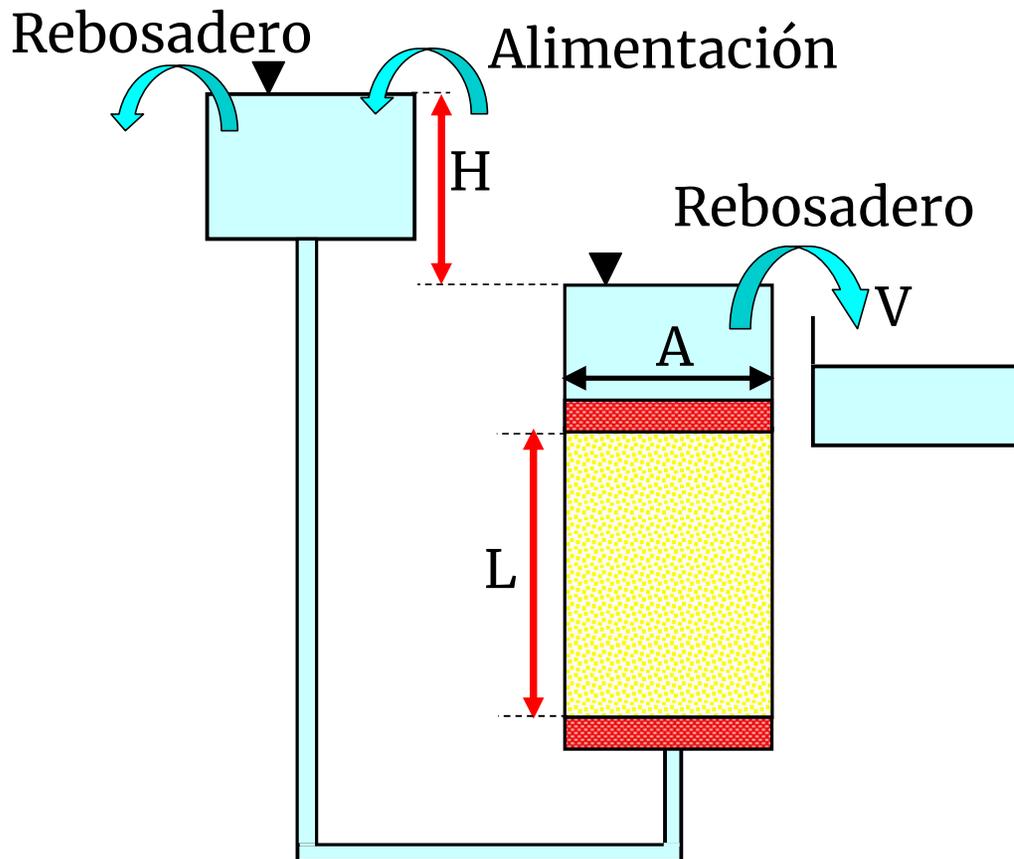
$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Gradiente Hidráulico}$$

k: Coeficiente de conductividad hidráulica

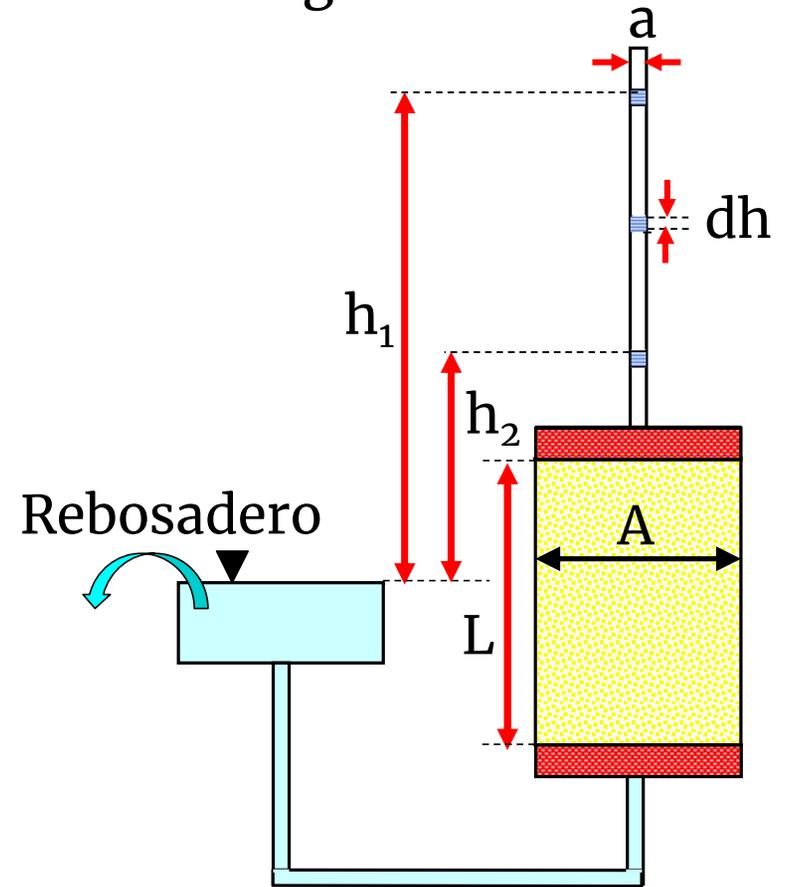


ENSAYOS DE CARGA HIDRÁULICA

Carga Constante (ASTM D2434)



Carga Variable



ENSAYOS DE CARGA HIDRÁULICA

Infiltrómetro de Doble Anillo (ASTM D3385)



COMPRESIBILIDAD

Disminución de volumen (relación de vacíos) por eliminación de aire y agua de poros causada por aumento de esfuerzos verticales



Asentamiento (Instantáneo)



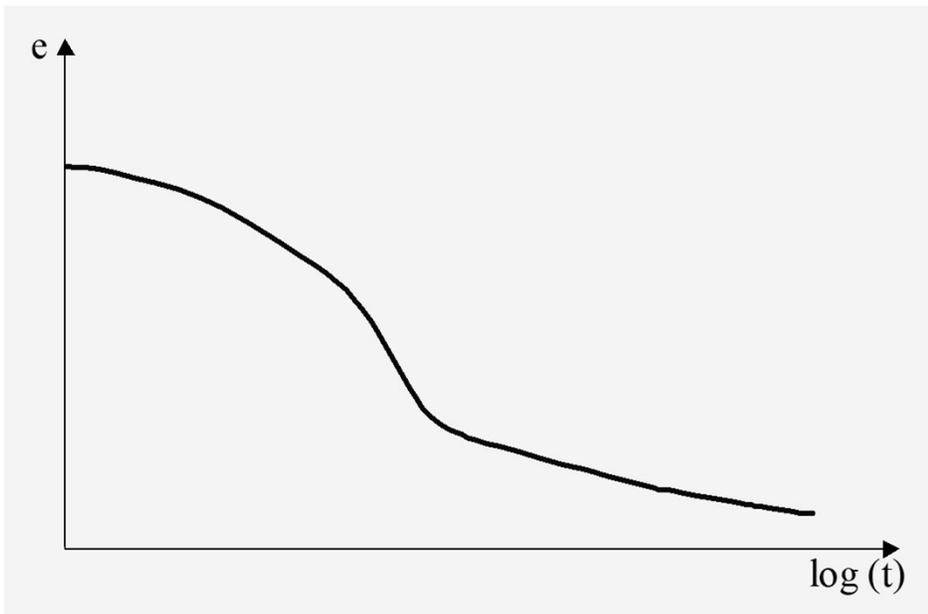
Consolidación (Diferido)

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN (ASTM D2435)



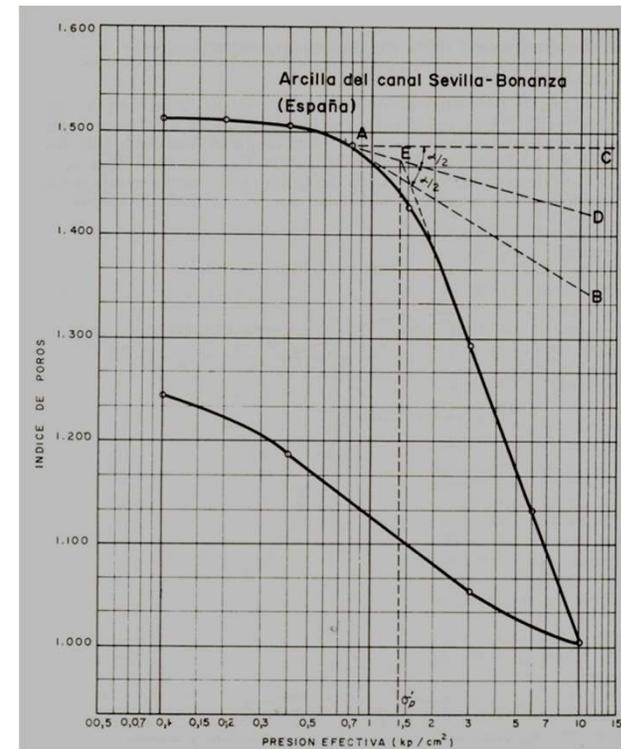
CONSOLIDACIÓN

Curva de Consolidación



C_v : Coeficiente de Consolidación

Curva de Compresibilidad



C_c : Coeficiente de Compresibilidad
 C_s : Coeficiente de Hentumecimiento

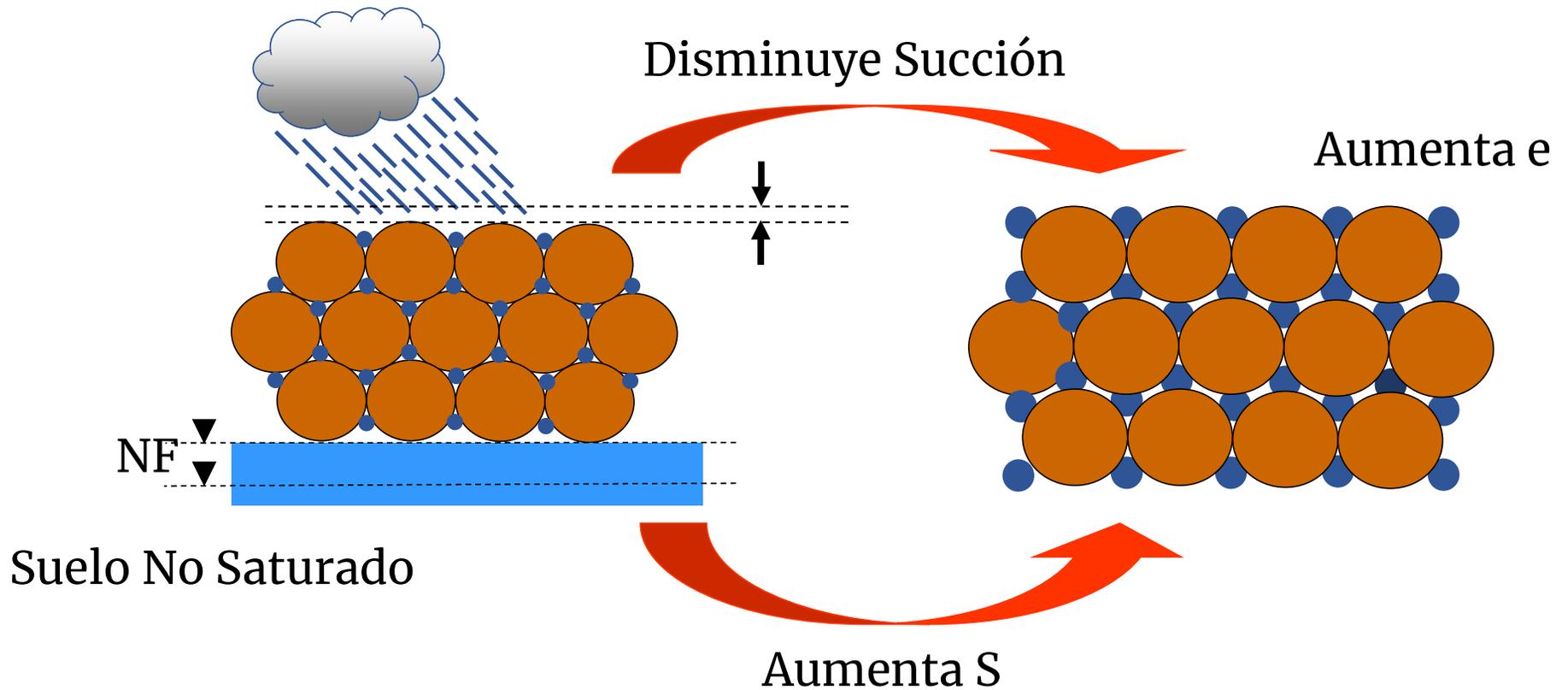
ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA

Expansión

Aumento de volumen (relación de vacíos) causado por aumento de Grado de Saturación



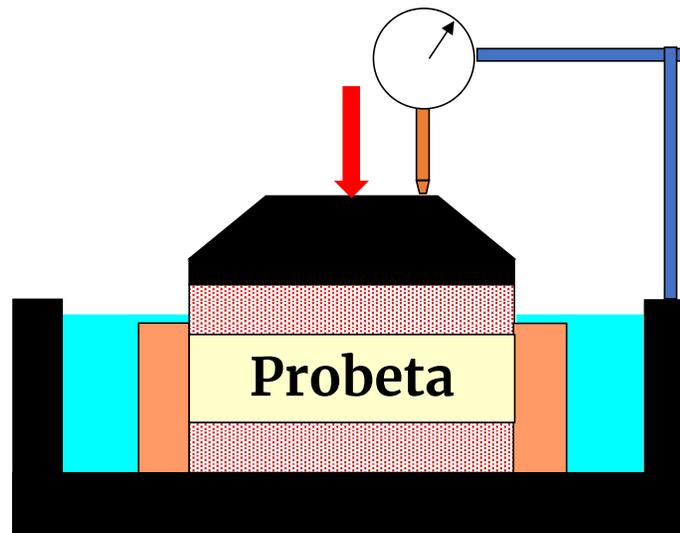
EXPANSIÓN



Crítico en Arcillas No Saturadas

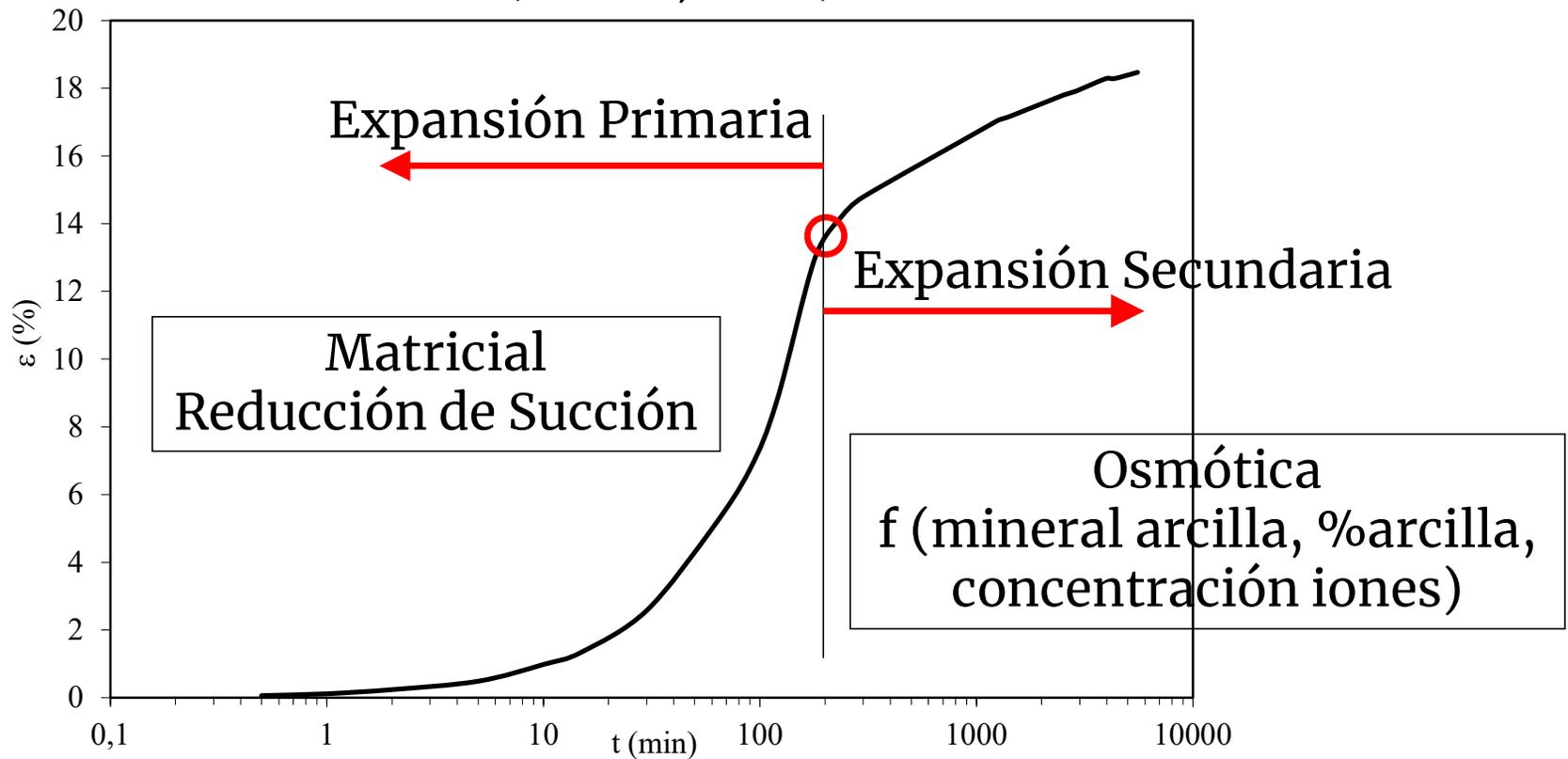
ENSAYO DE EXPANSIÓN (ASTM D4546)

Expansión Libre
Presión de Expansión



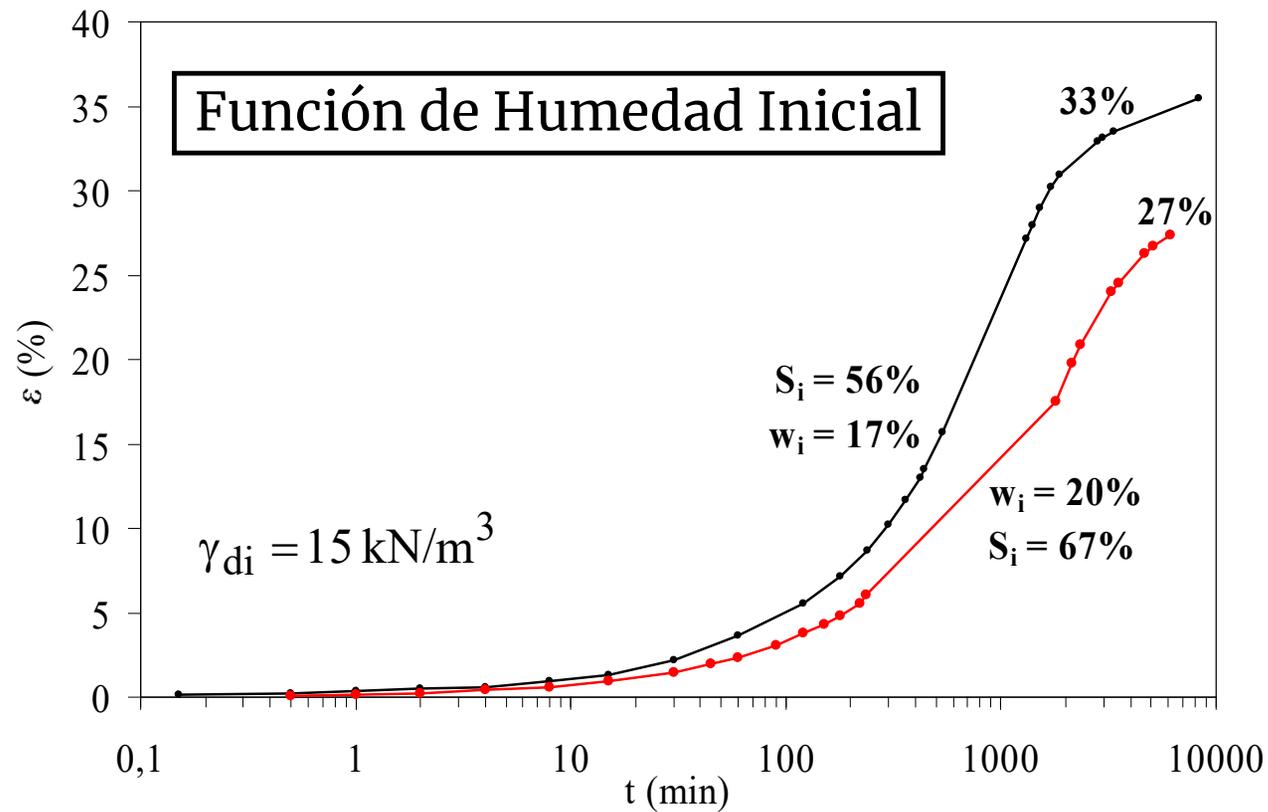
EXPANSIÓN LIBRE

Descompuesto de Formación Arapey (ML)
(Behak, 2001)



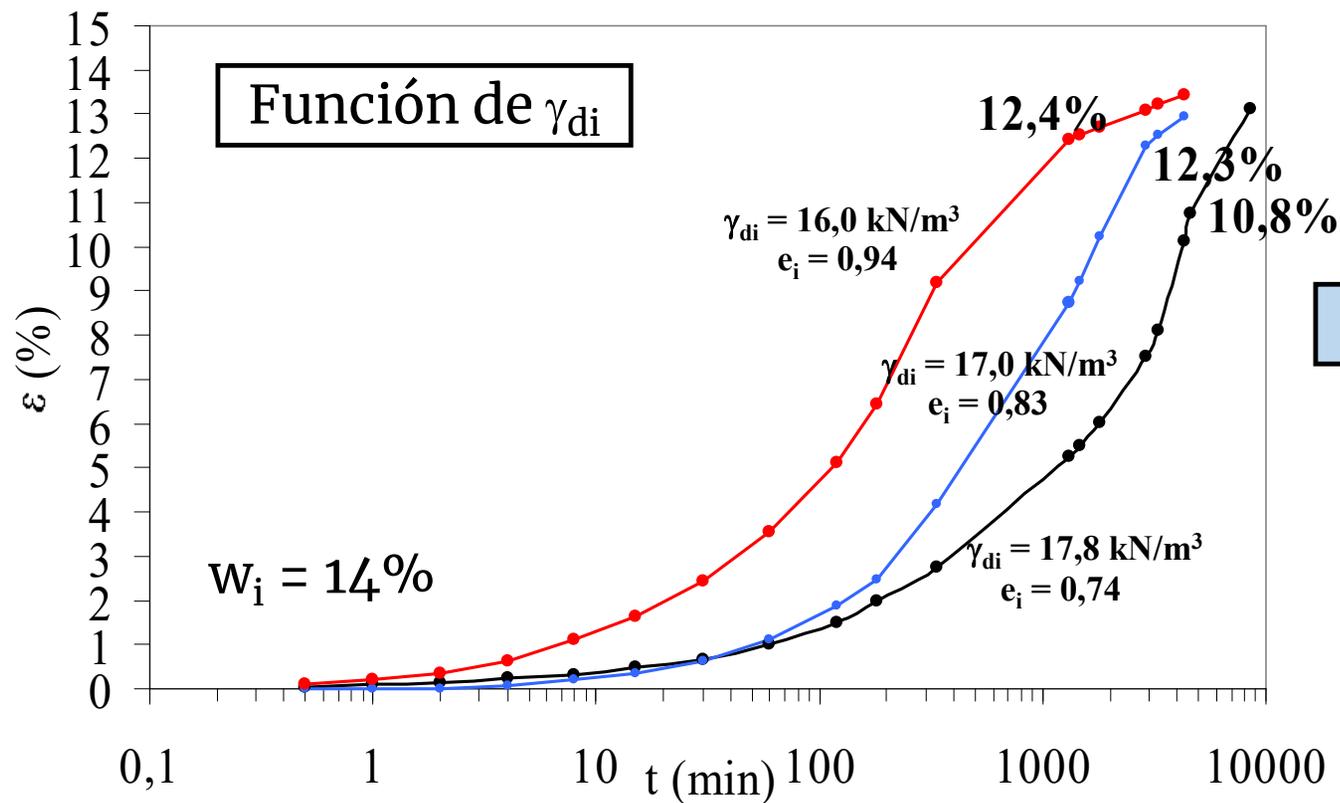
EXPANSIÓN LIBRE

Arcilla Formación Libertad (CH), Ruta 1, 58K800
(Musso, Rostan & Behak, 2003)



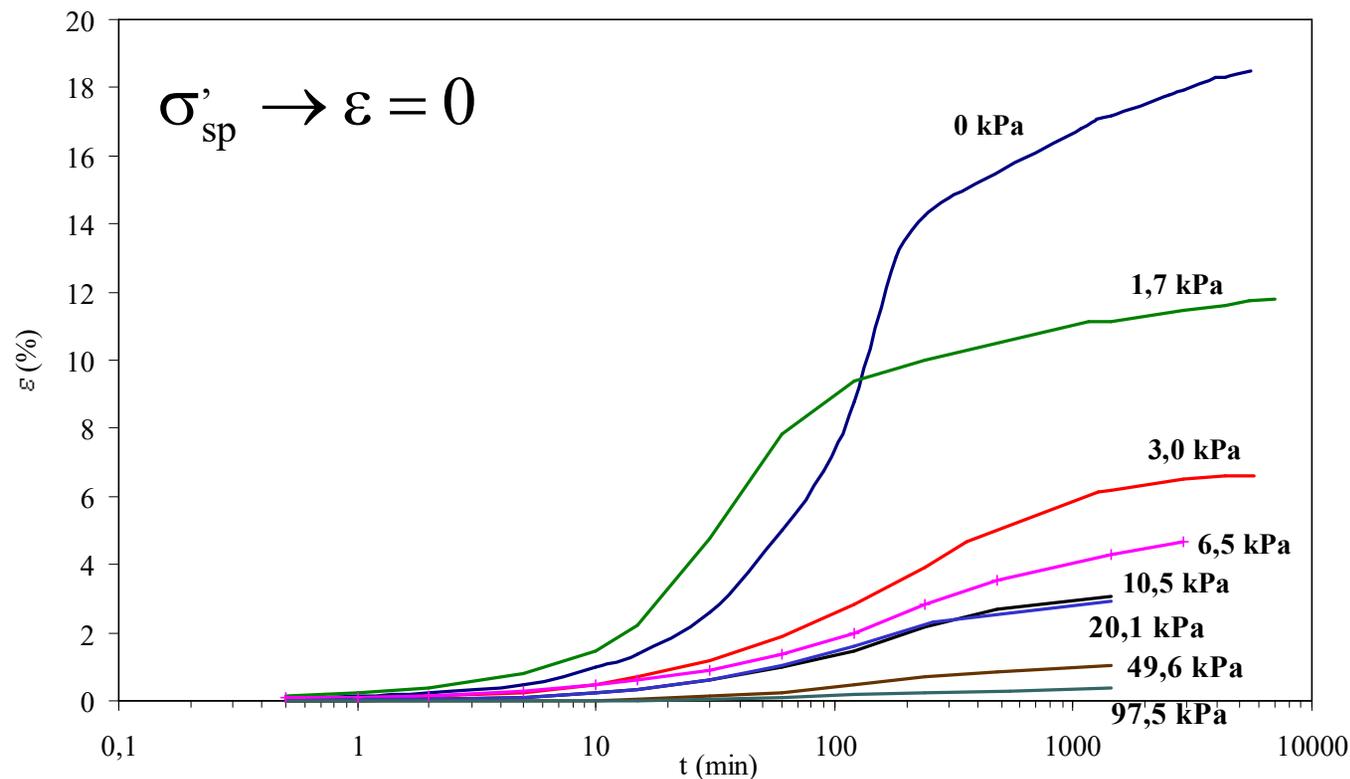
EXPANSIÓN LIBRE

Arcilla Formación Libertad (CH), Anillo Perimetral de Montevideo
(Rostan, Musso, & Behak, 2007)



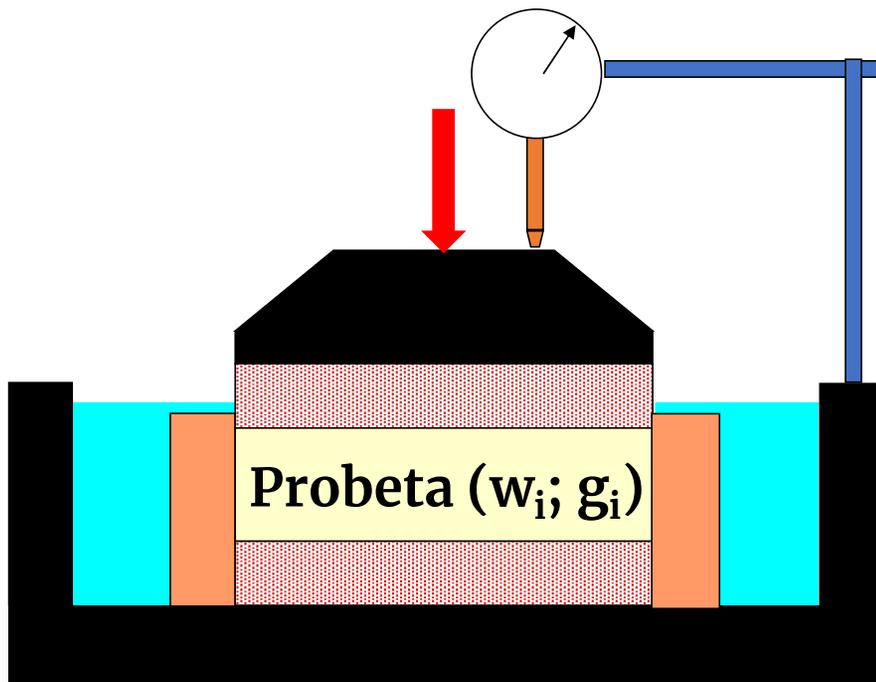
PRESIÓN DE EXPANSIÓN (σ'_{sp})

Esfuerzo Necesario para Anular la Expansión
Descompuesto de Fm Arapey (ML) (Behak, 2001)



ENSAYO DE PRESIÓN DE EXPANSIÓN (ASTM D4546)

Ensayo de Presión de Expansión (Norma ASTM D4546)



Método a Volumen Constante

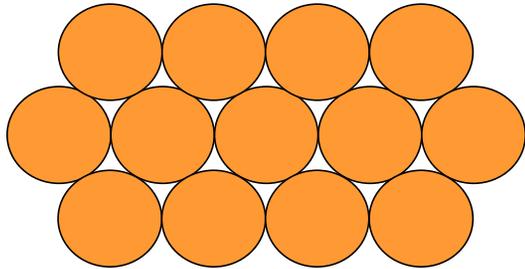
- Incrementar carga hasta obtener $V = \text{cte}$

$$\sigma'_{sp} = q \text{ para } V = \text{cte.}$$

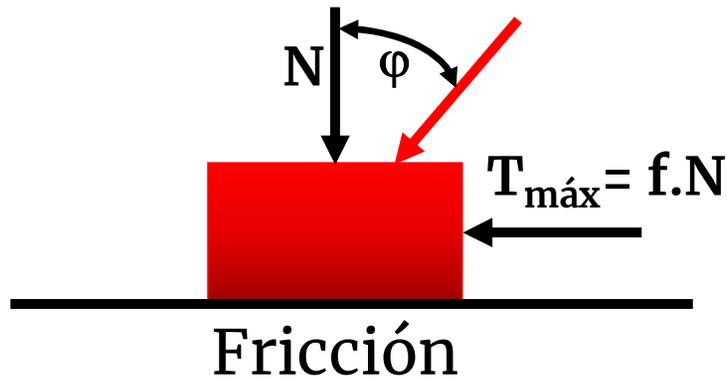
MÉTODOS INDICATIVOS DE POTENCIAL EXPANSIVO

Actividad Coloidal (Skempton, 1953)	$A = \frac{IP}{\% \text{ Pasa } 2\mu\text{m}}$
Potencial Expansivo (Seed et al., 1963)	$PE = KC^x$
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	Azul de Metileno
Índice de Expansividad	Ensayo Lambe

RESISTENCIA AL CORTE DE LOS SUELOS



Medio Granular sin Cementación
entre Partículas

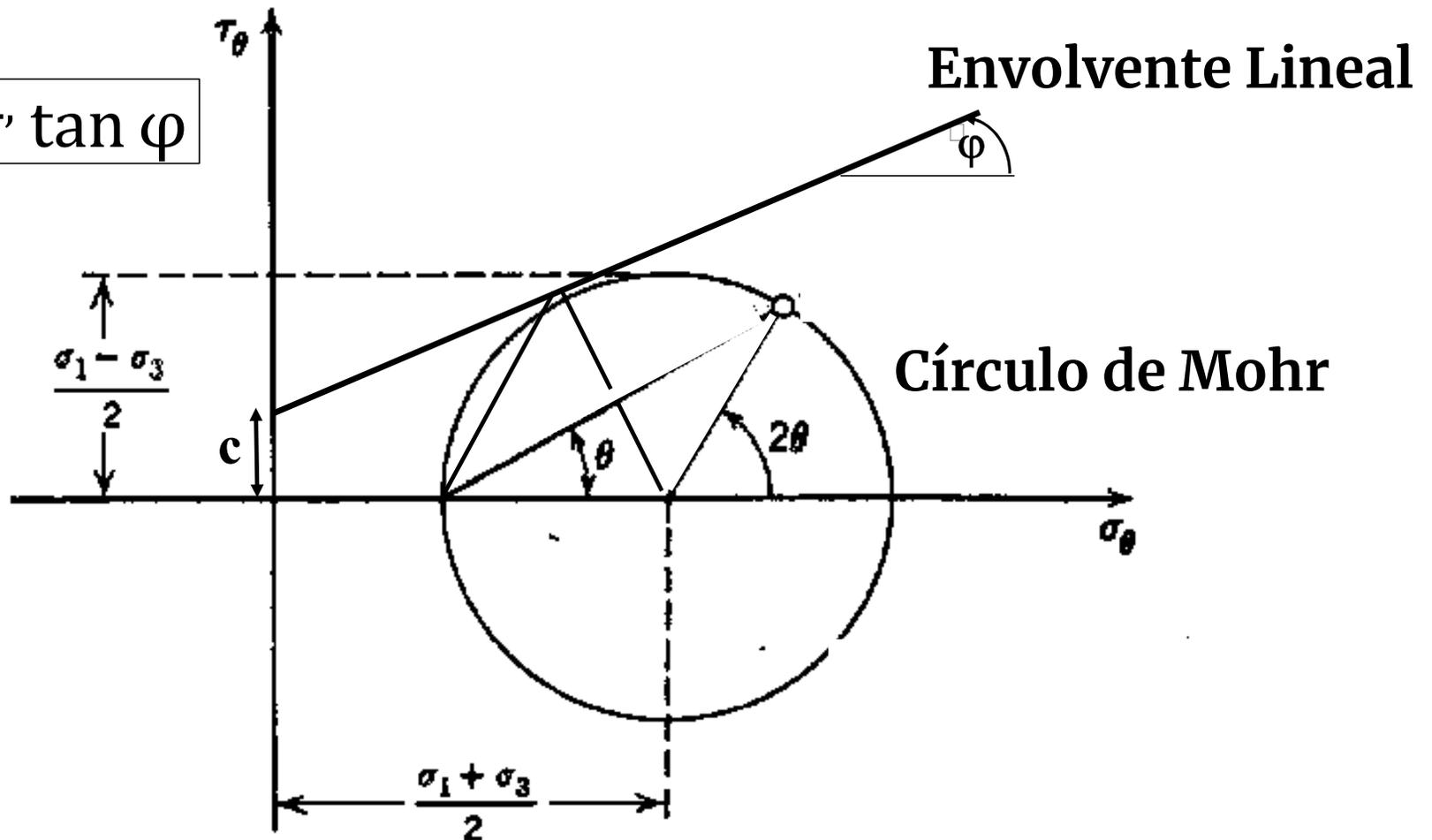


$$T = C + N \tan \varphi$$

Teoría de Coulomb

TEORÍA DE FALLA DE MOHR-COULOMB

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi$$



ENSAYOS DE RESISTENCIA AL CORTE

Corte Directo
(ASTM D3080)



Triaxial
(ASTM D2850 (UU);
ASTM D4767 (CU);
ASTM D7181 (CD))

Compresión
Inconfinada
(ASTM D2166)



DURABILIDAD

Resistencia de los suelos a los procesos de intemperismo, erosión y tránsito

Problema Superficial	Caminos, Capas de Pavimentos Revestidos, Canales
Problema Interno	Presas de Tierra

Suelos Naturales	Baja resistencia al agua de arcillas Baja resistencia al tránsito de suelos con poco fino
Suelos Estabilizados	Baja durabilidad por elección inadecuada o dosificación insuficiente de estabilizante

DURABILIDAD

Es difícil de evaluar por falta de ensayos adecuados
Los ensayos son más cualitativos que cuantitativos



Ensayo de Humedecimiento-Secado
Ensayo de Congelamiento-Deshielo

La Durabilidad del suelo estabilizado es mayor que la del suelo natural
No sólo la resistencia, sino también y a veces principalmente, la durabilidad definen el tenor de estabilizante a ser agregado a un suelo (Núñez, 1991)

MEJORAMIENTO DE PROPIEDADES DE SUELOS

Conductividad Hidráulica	Reducción	Compactación, Cementación, Geomembranas
	Aumento	Floculación
Compresibilidad	Compactación, Precarga, Drenes Verticales, Restricción de Flujo, Cementación	
Estabilidad Volumétrica	Cementación (Cal), Térmica Sellado Asfáltico, Geomembranas	
Resistencia	Compactación, Granulometría, Cementación	