

# ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

## Propiedades de los Suelos

---



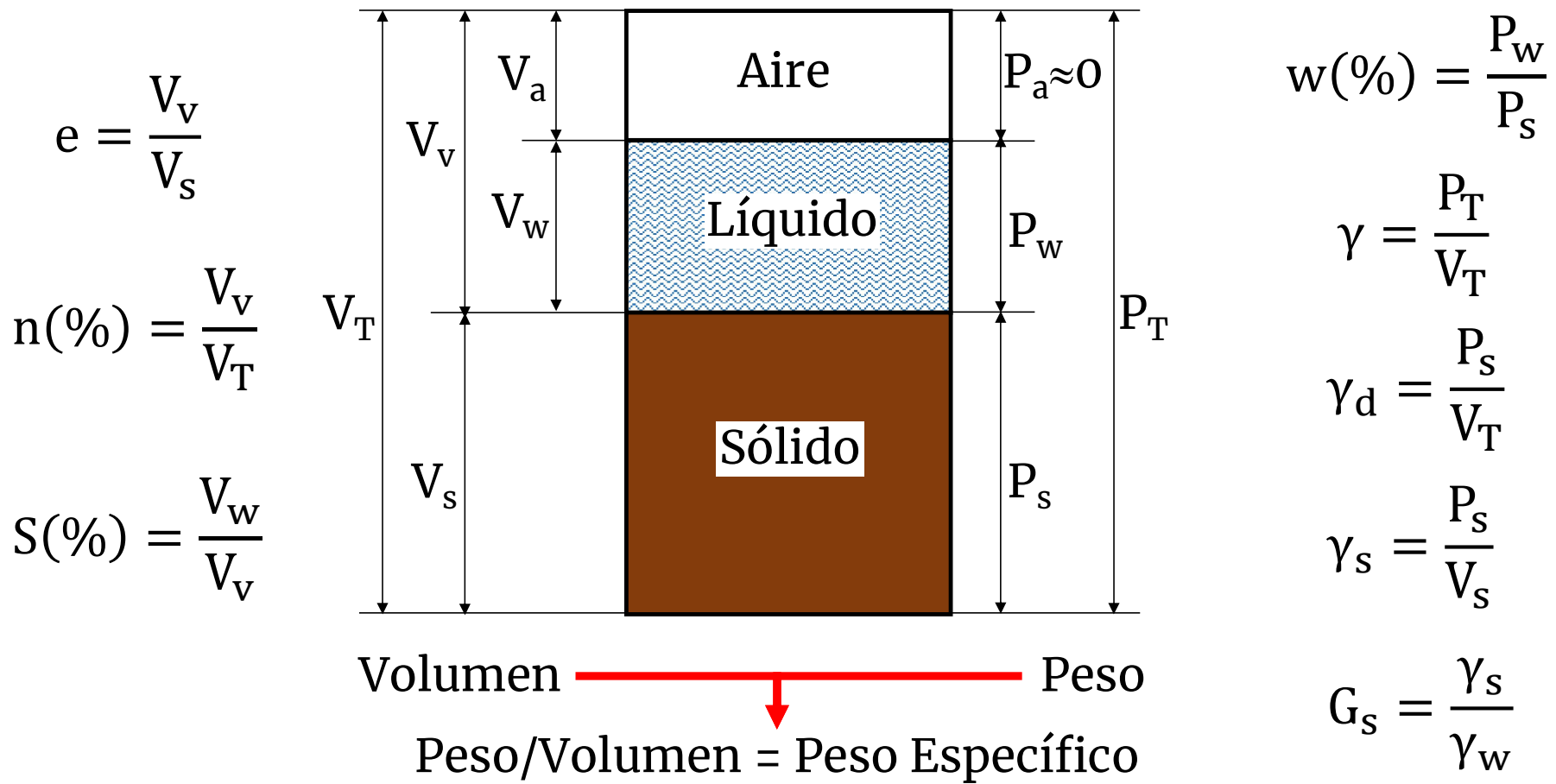
FACULTAD DE  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

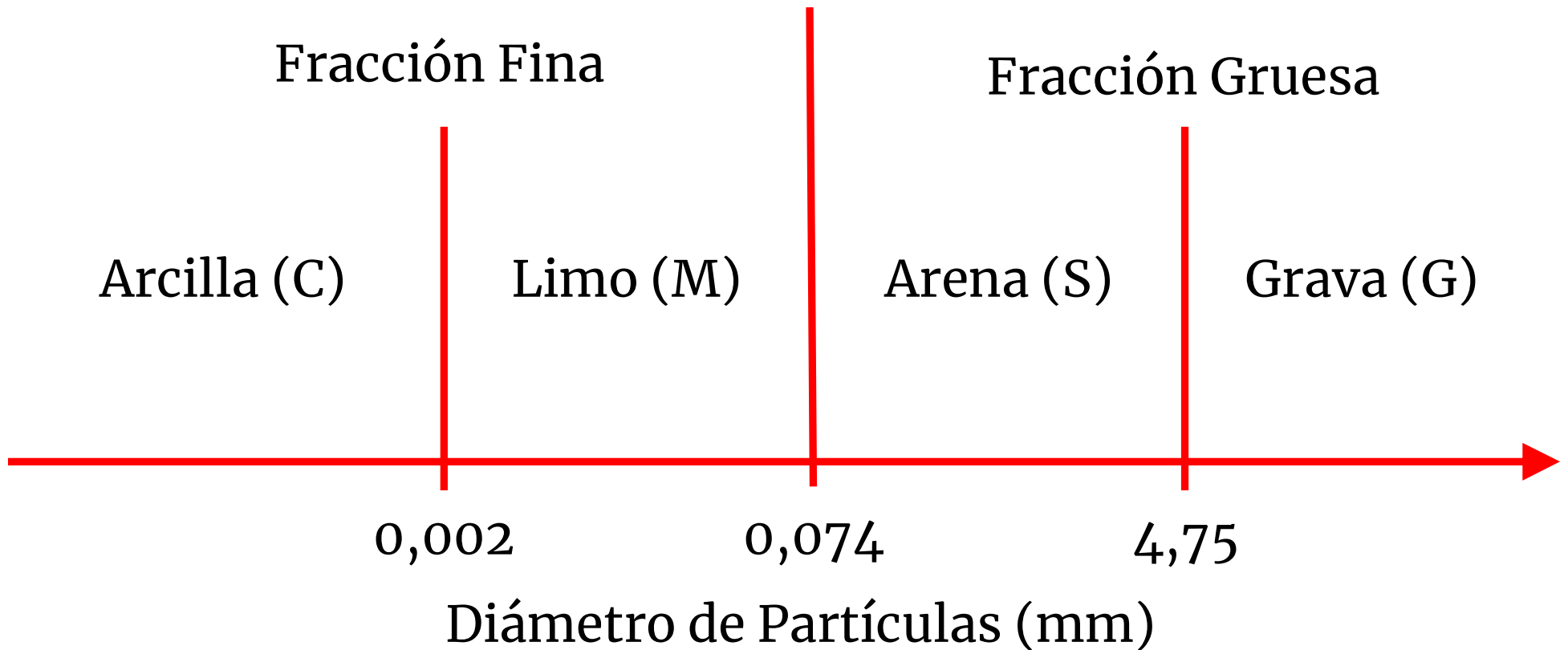
Dr. Ing. Leonardo Behak  
Instituto de Estructuras y Transporte

# PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO



# GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS

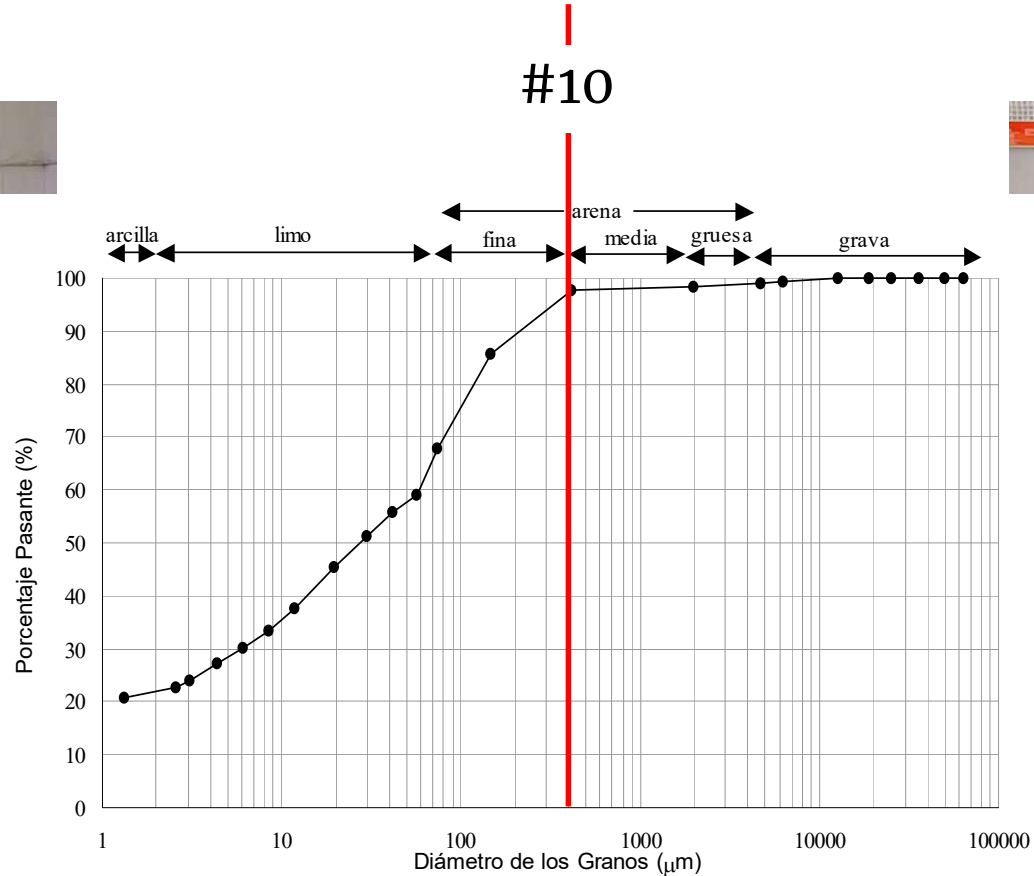
## Norma ASTM D2487



# GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS

## Análisis Granulométrico (ASTM D422)

### Sedimentación

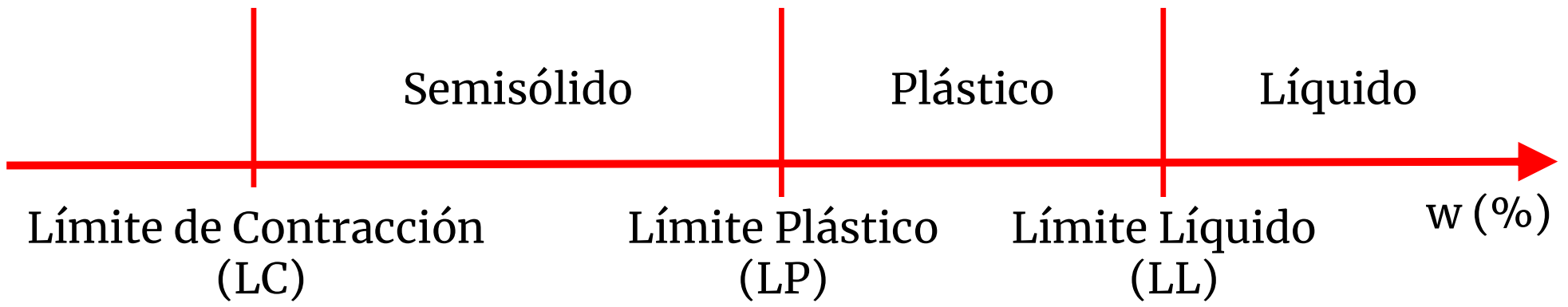


### Tamizado



# PROPIEDADES PLÁSTICAS DE LOS FINOS

## Límites de Consistencia (ASTM D4318)

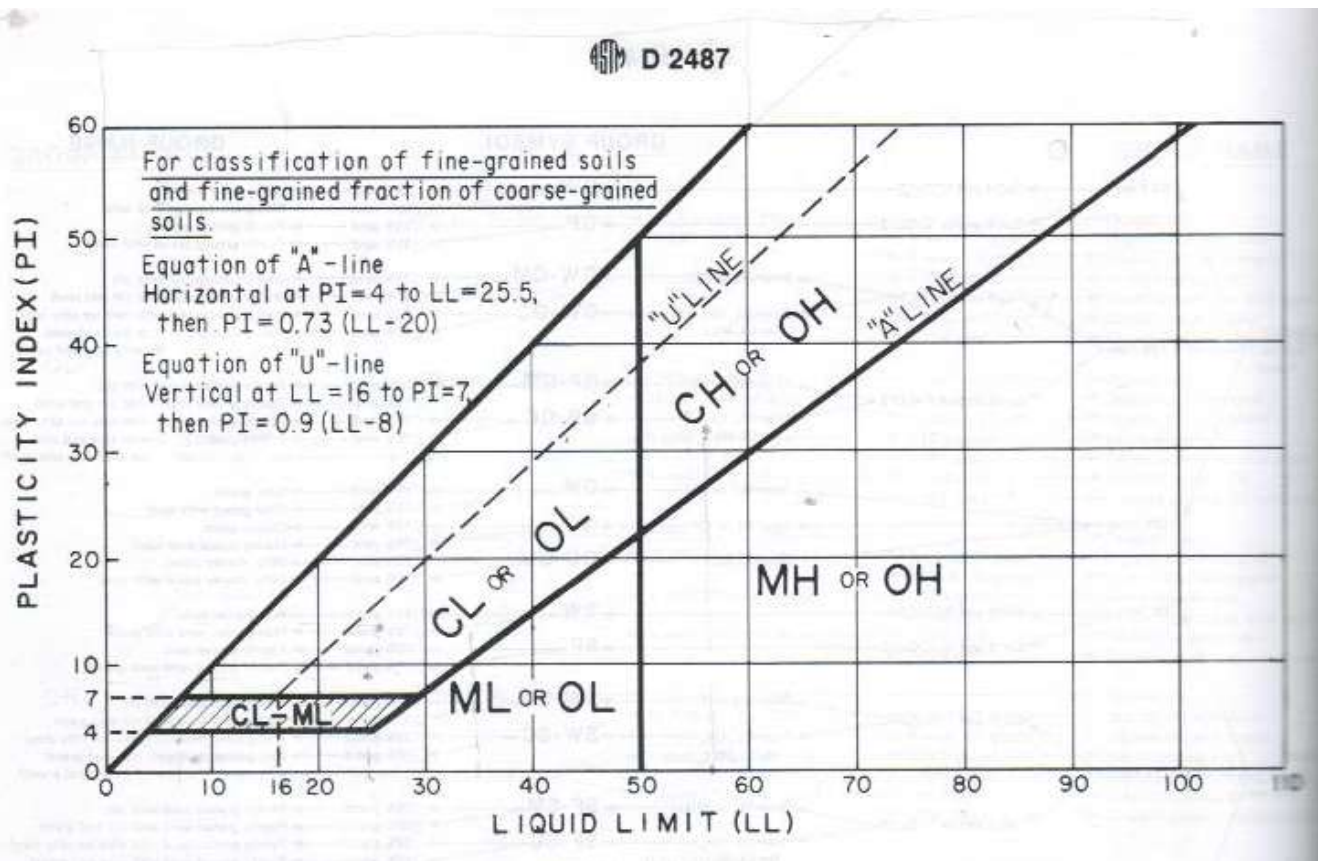


Índice Plástico (IP)



# PROPIEDADES PLÁSTICAS DE LOS FINOS

## Carta de Plasticidad



L: Baja Compresibilidad  
H: Alta Compresibilidad



# CLASIFICACIÓN DE SUELOS

## Sistema 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	40 máx	41 min	40 máx	41 min	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

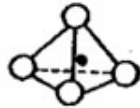
Silicatos de Aluminio  
Hidratados

Silicatos de Magnesio  
Hidratados

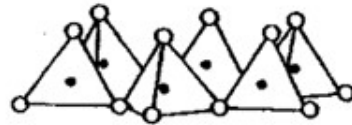
$\text{Fe}^{2+}$ ;  $\text{Fe}^{3+}$ ;  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{Na}^{+}$ ;  $\text{K}^{+}$ ;  $\text{H}^{+}$ , etc.

# UNIDADES ESTRUCTURALES BÁSICAS DE ARCILLAS

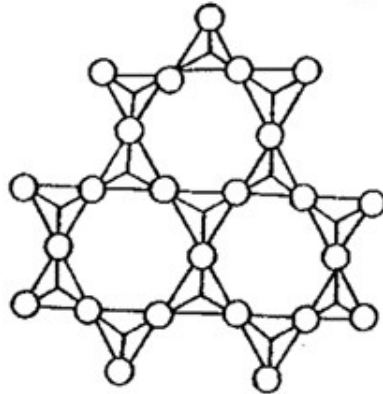
TETRAEDRO DE  $\text{SiO}_4$



- ÁTOMOS DE OXIGENO
- ÁTOMOS DE SILICIO

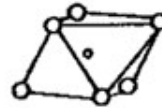


CAPA DE TETRAEDROS DE  $\text{SiO}_4$

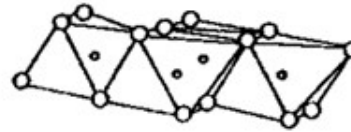


Sílice

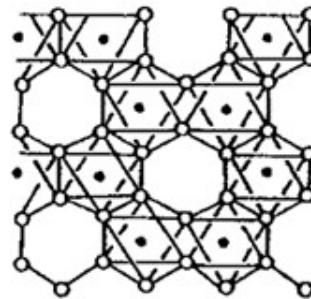
OCTAEDRO DE  $\text{AlO}_6$



- ÁTOMOS DE OXIGENO
- ÁTOMOS DE ALUMINIO



CAPA DE TETRAEDROS DE Al



Gibsita

Octaedro de  
Magnesio



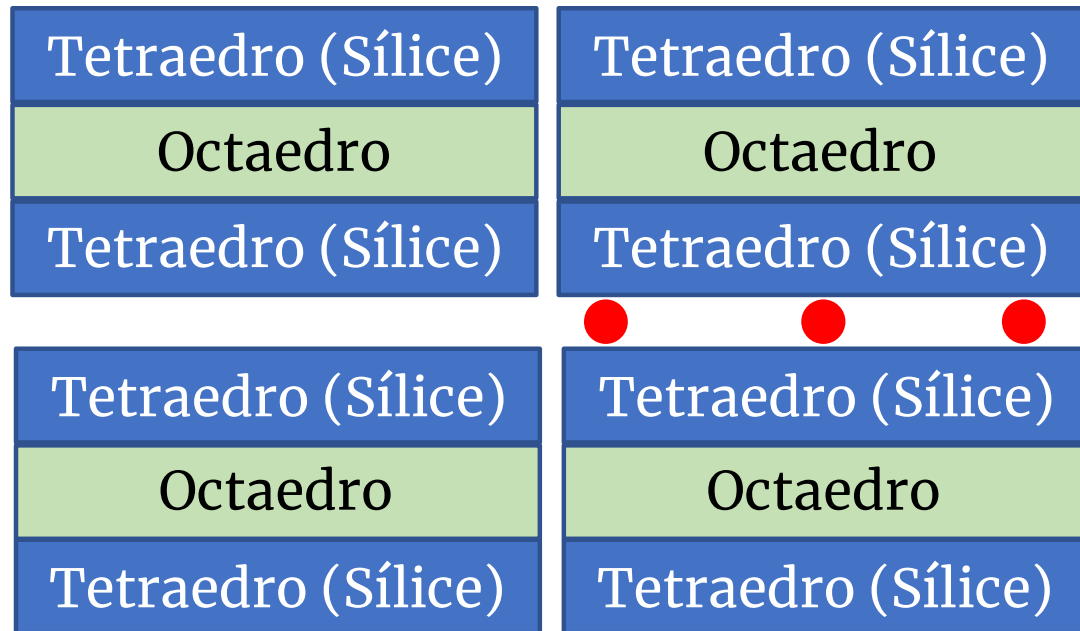
Brucita

# ESTRUCTURAS DE ARCILLAS

## Estructura 1:1



## Estructura 2:1



Espacio Intercapa

# CLASIFICACIÓN DE MINERALES ARCILLOSO

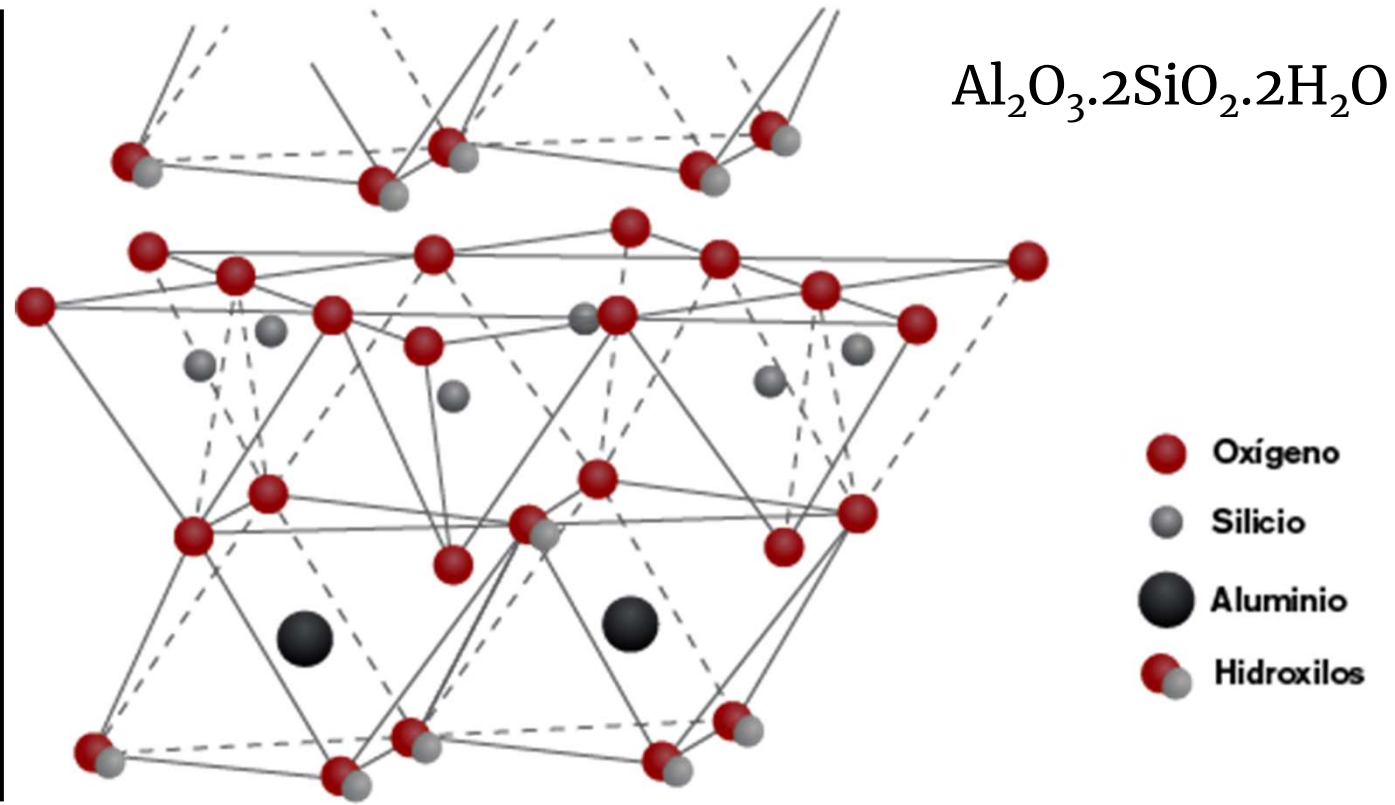
AIPEA (1976)

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

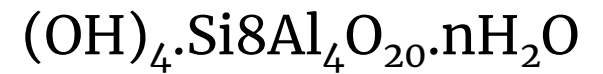
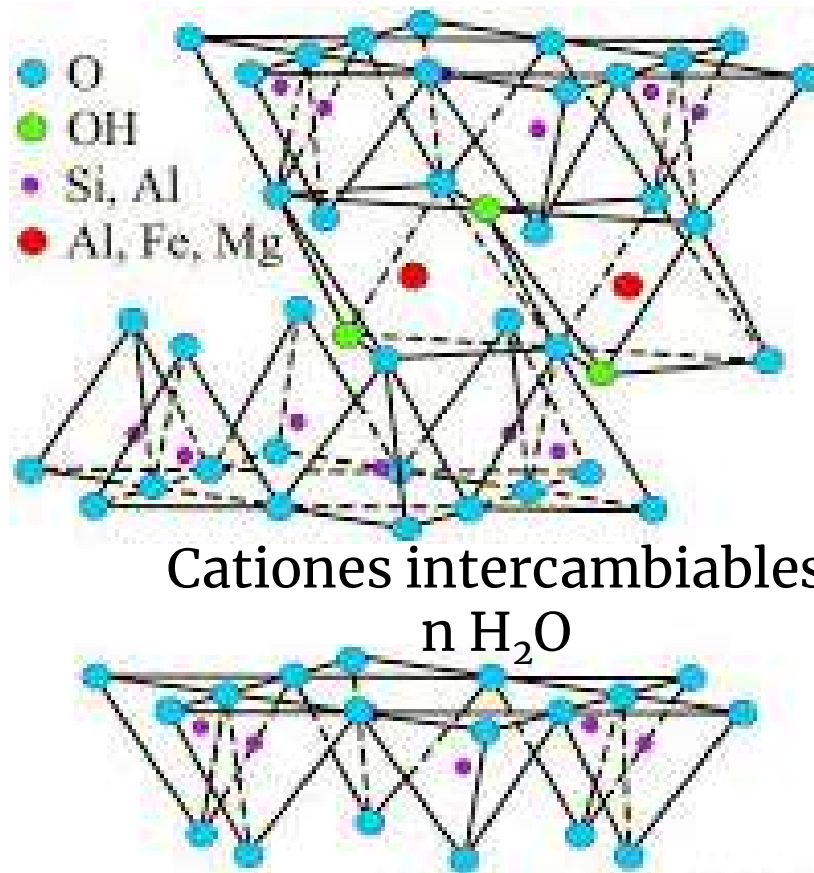
# GRUPO CAOLINITA (1:1)

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



Estructura Estable en presencia de agua

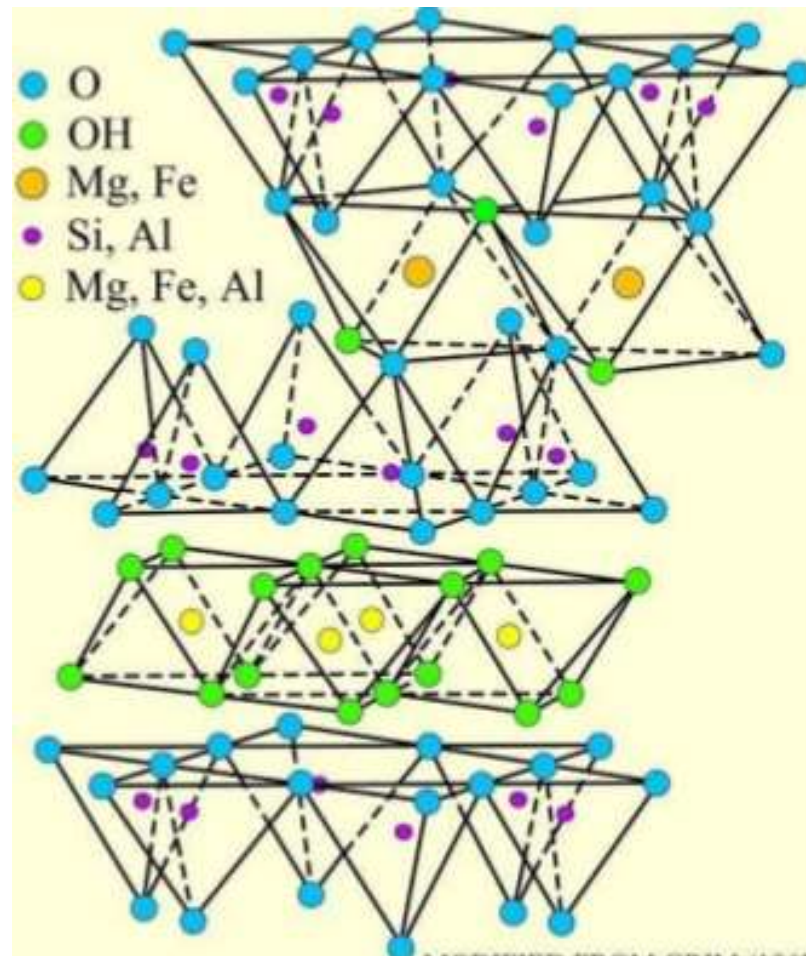
# GRUPO ESMECTITA (2:1) (MONTMORILLONITA)



Cationes intercambiables  
n H<sub>2</sub>O

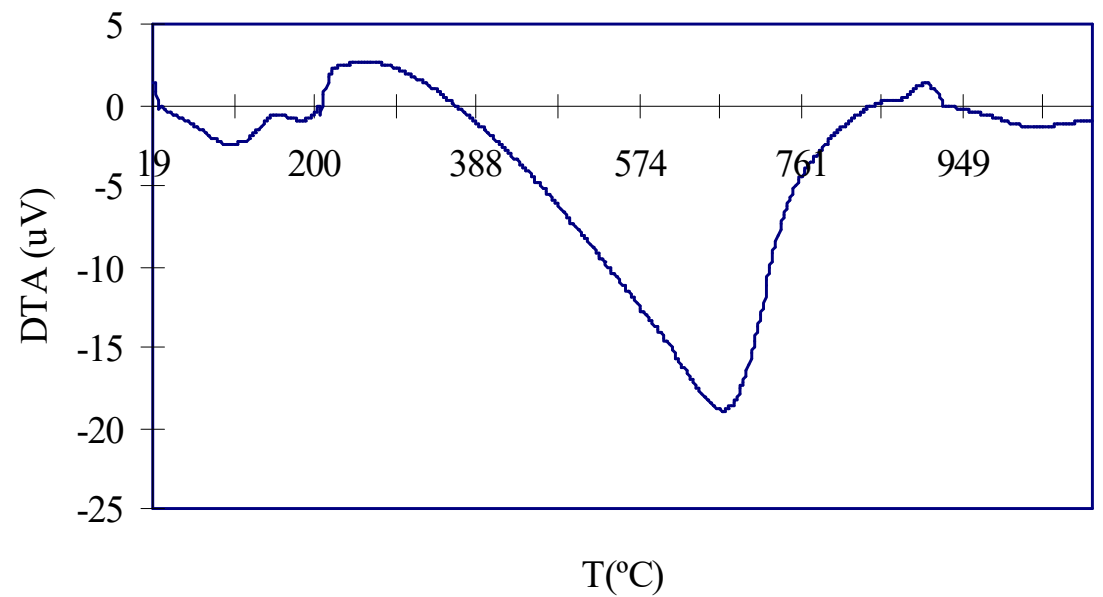
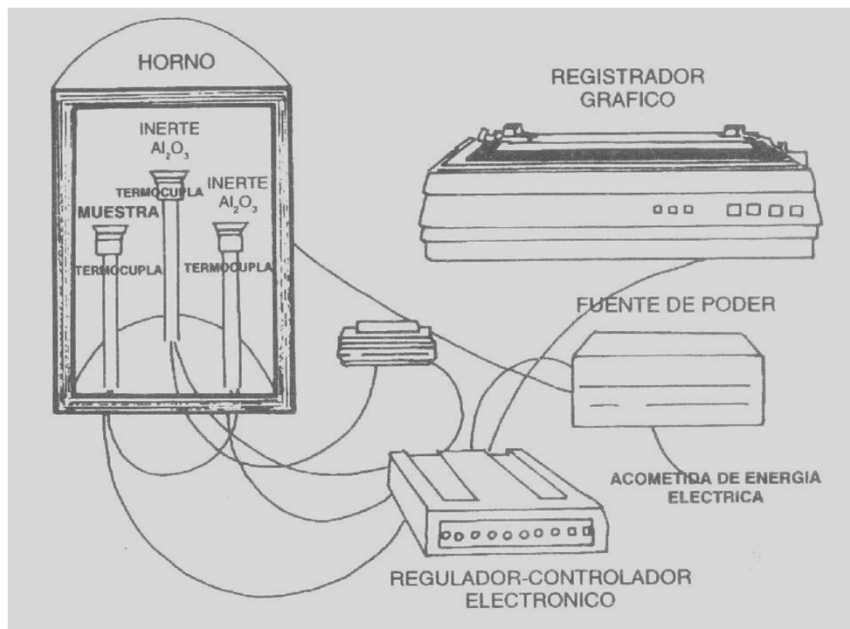
Expansividad estructural por absorción de agua o moléculas polares

# GRUPO CLORITA (2:1)



# TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE ARCILLAS

## Análisis Térmico Diferencial (ATD)



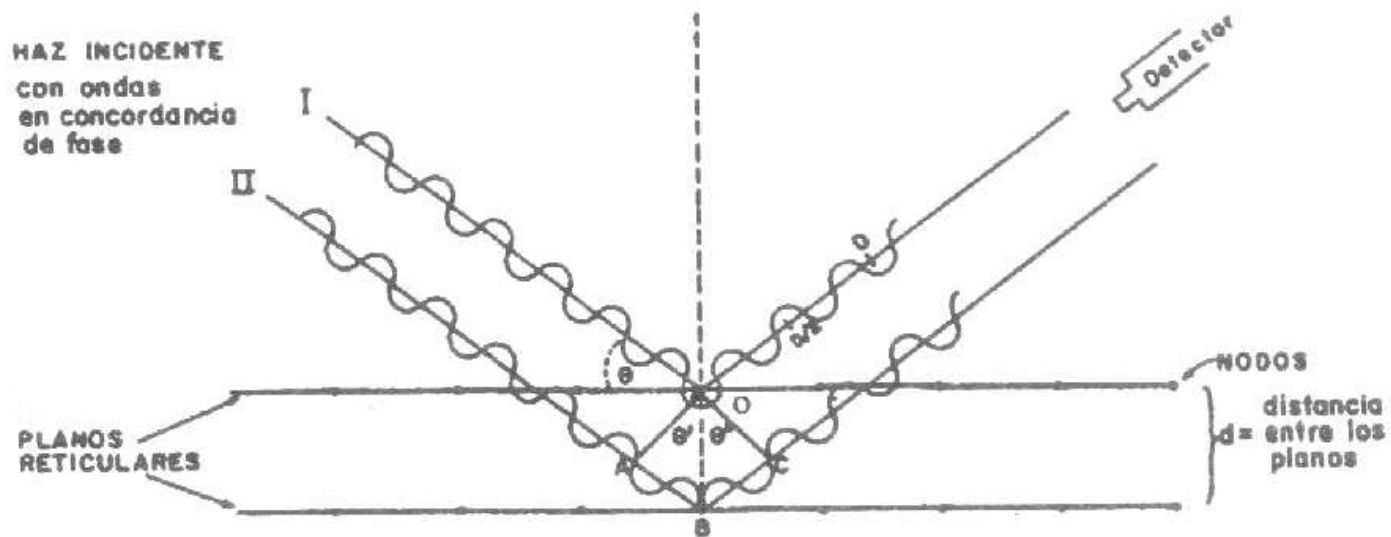
ATD Esmeclita



# TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE ARCILLAS

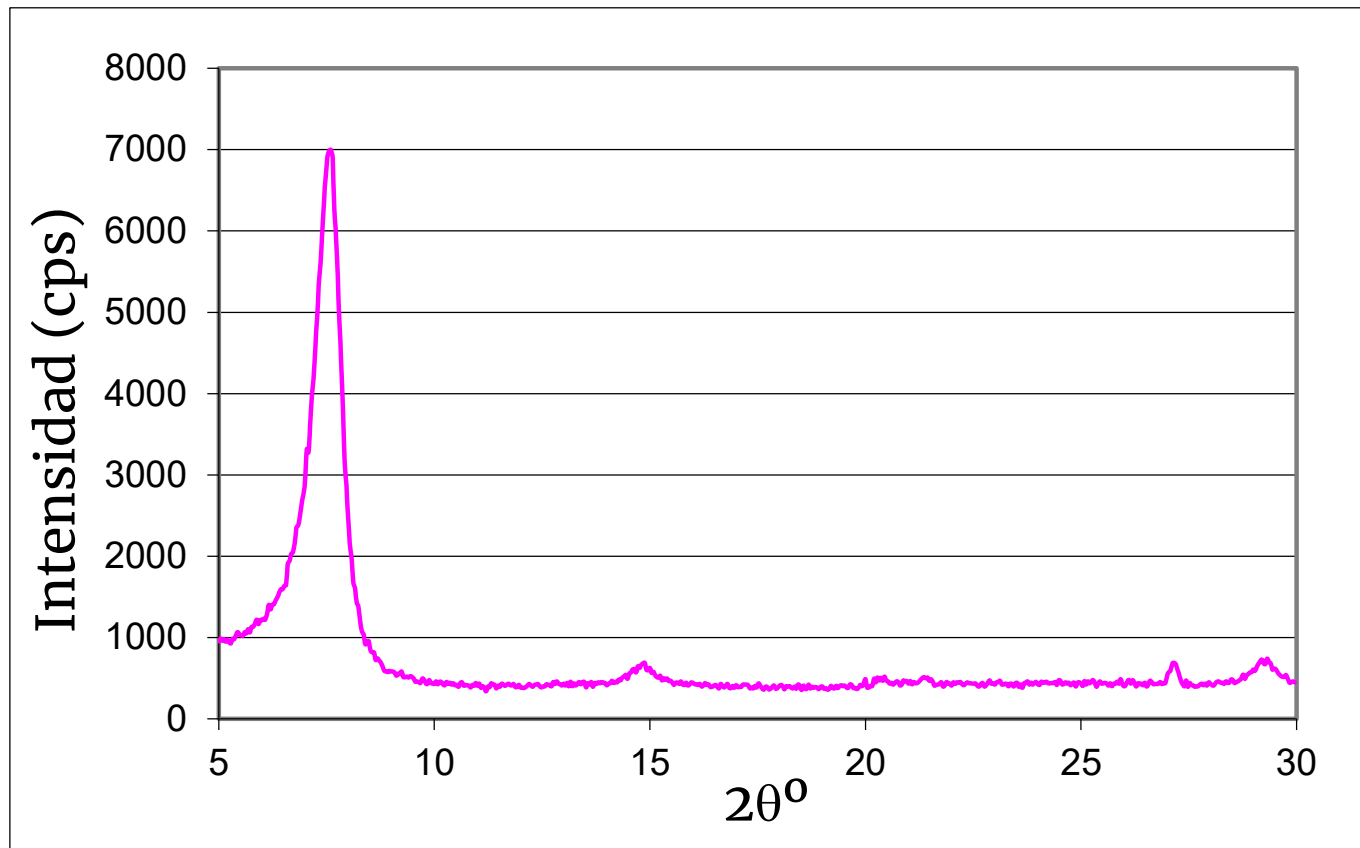
## Difracción de Rayos X (DRX)

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



# TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE ARCILLAS

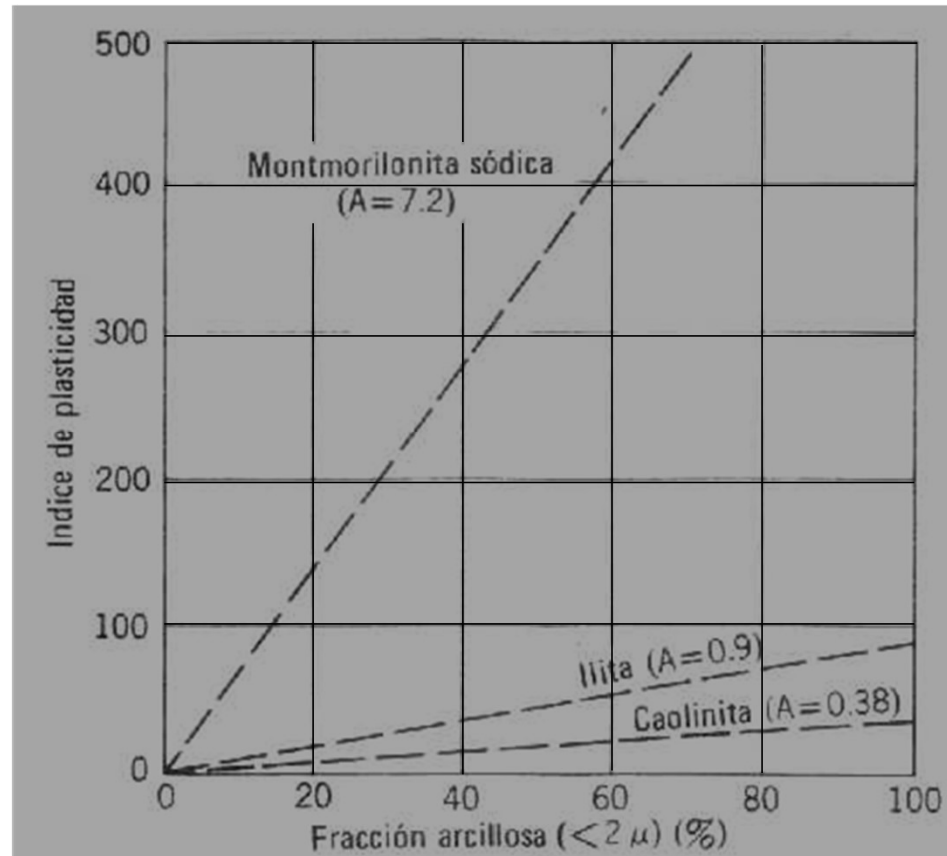
## DRX Esmectita



# TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE ARCILLAS

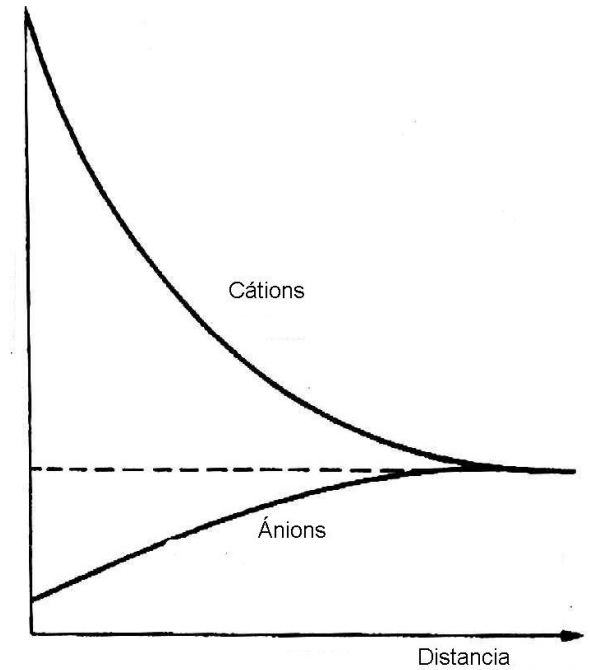
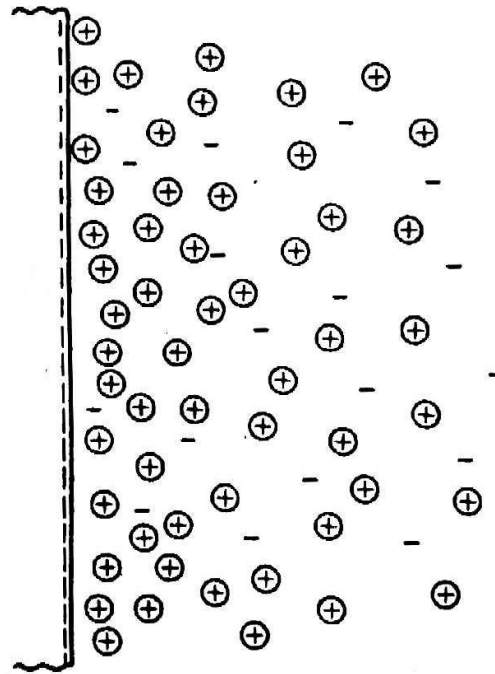
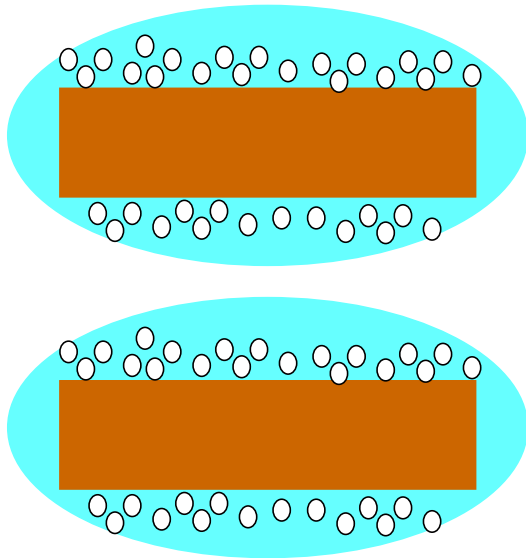
## Actividad Coloidal (Skempton, 1953)

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



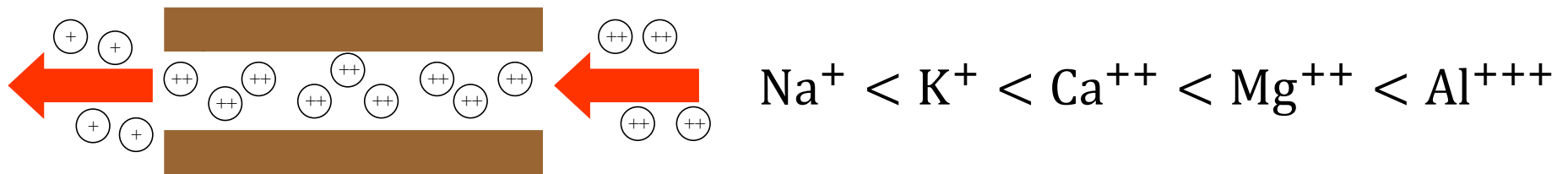
# PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS

## 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 <sup>2</sup> /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

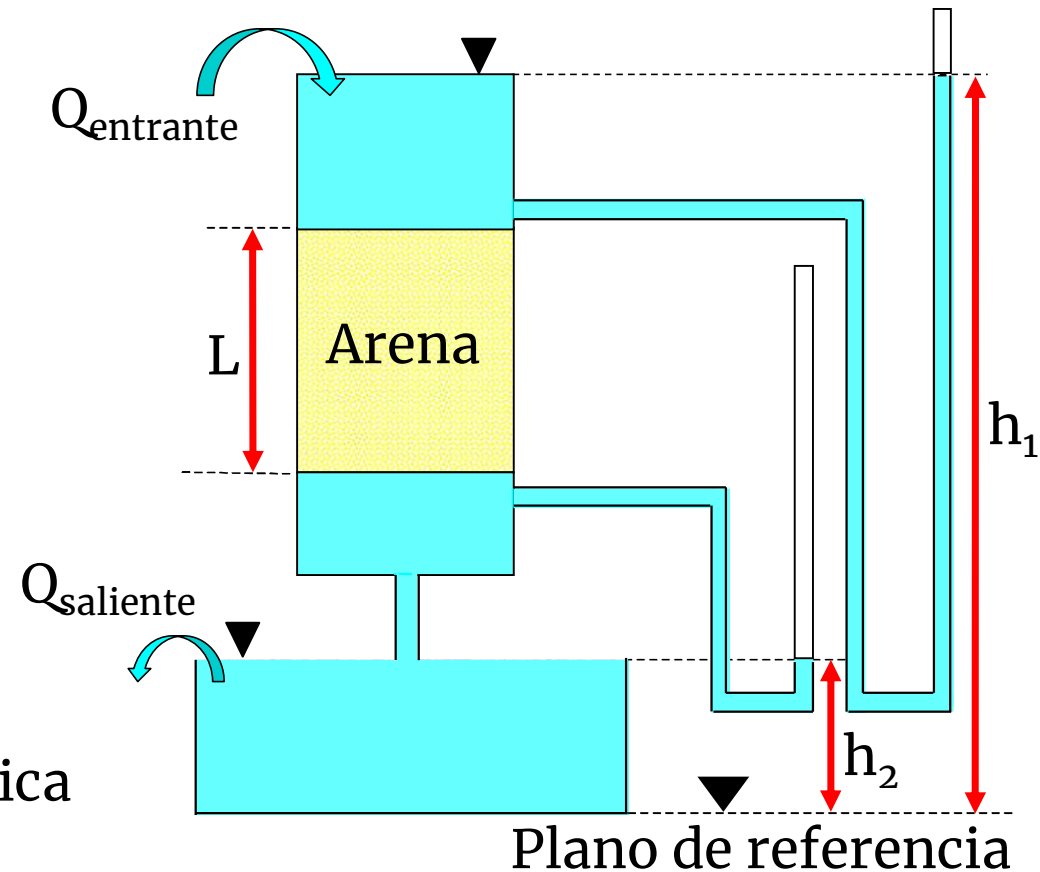
Ley de Darcy (1856)

Flujo laminar, estacionario  
y unidireccional

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

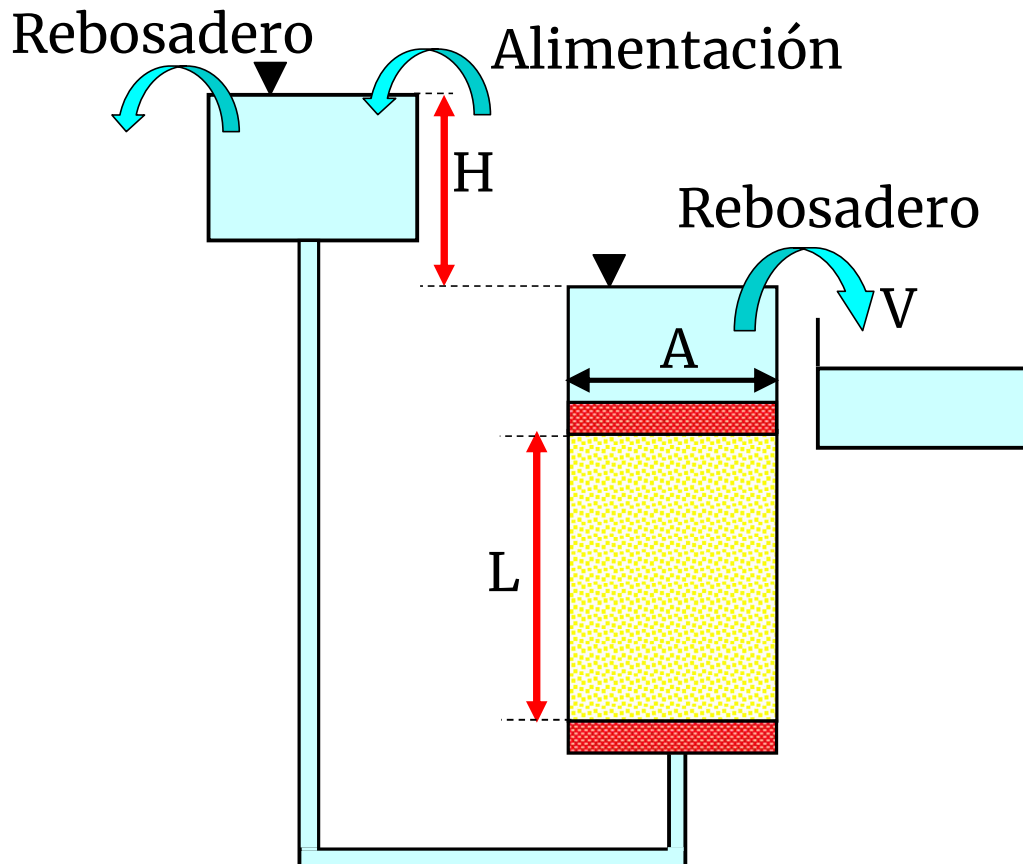
$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Gradiente Hidráulico}$$

k: Coeficiente de conductividad hidráulica

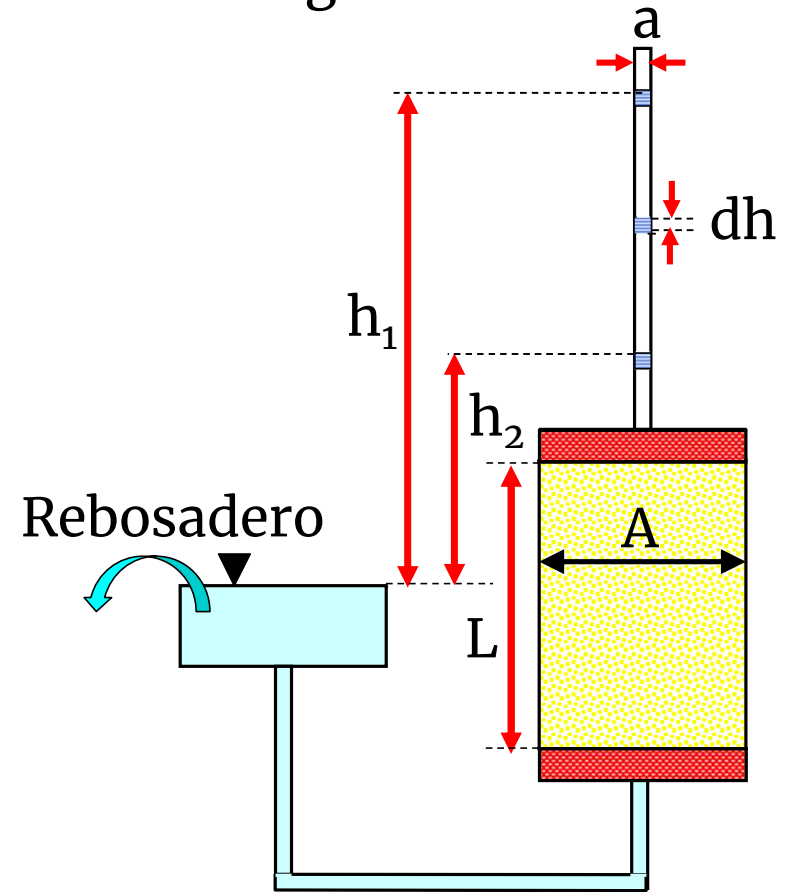


# ENSAYOS DE CARGA HIDRÁULICA

## 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)



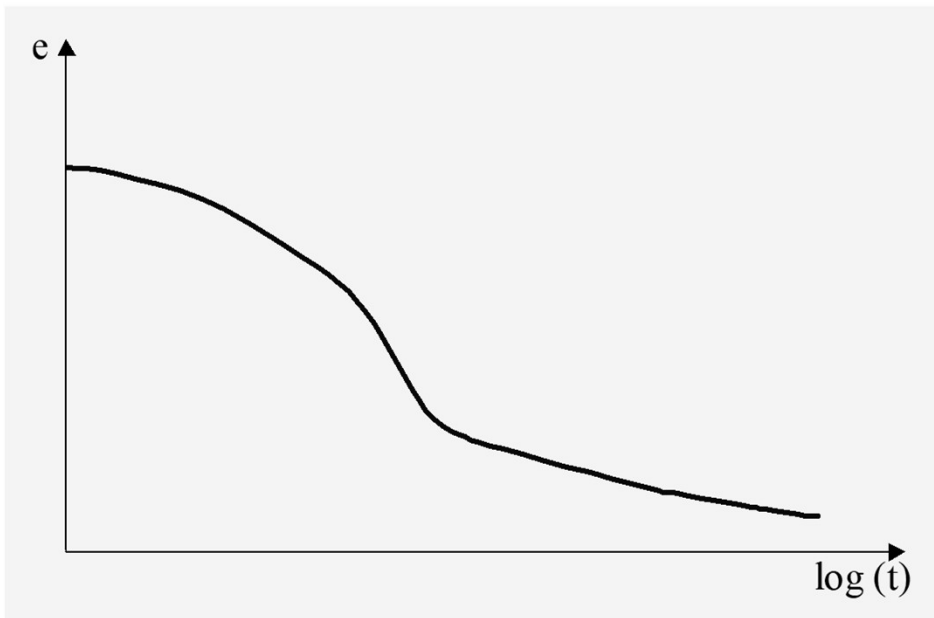
Consolidación (Diferido)

# ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN (ASTM D2435)



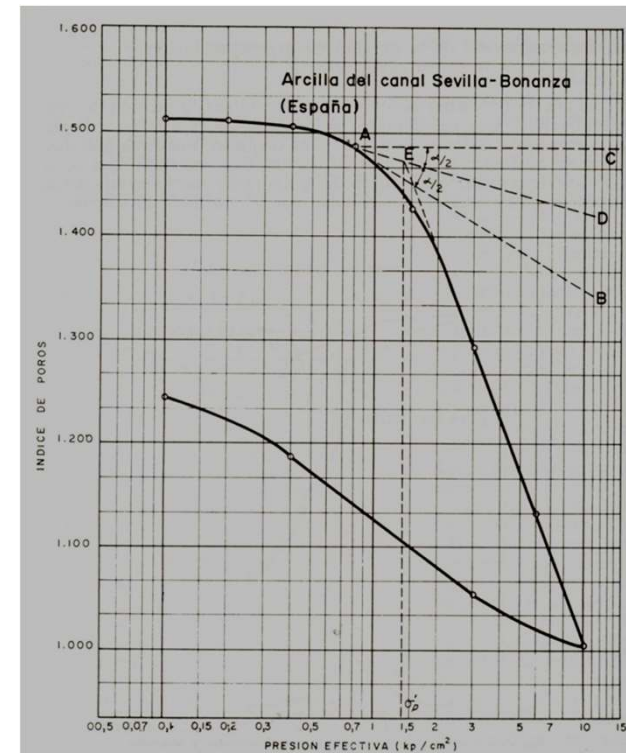
# CONSOLIDACIÓN

## Curva de Consolidación



$C_v$ : Coeficiente de Consolidación

## Curva de Compresibilidad



$C_c$ : Coeficiente de Compresibilidad  
 $C_s$ : Coeficiente de Hentumecimiento



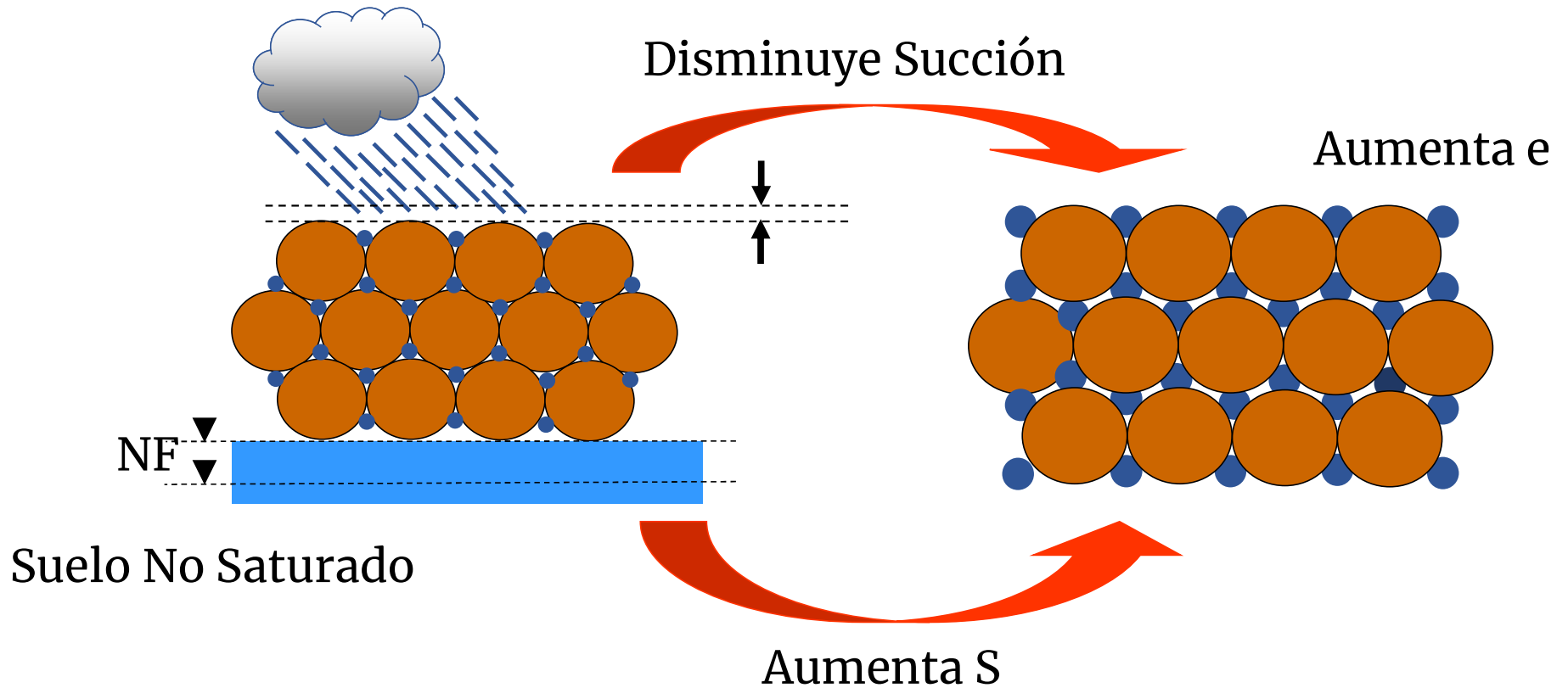
# ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA

## Expansión

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



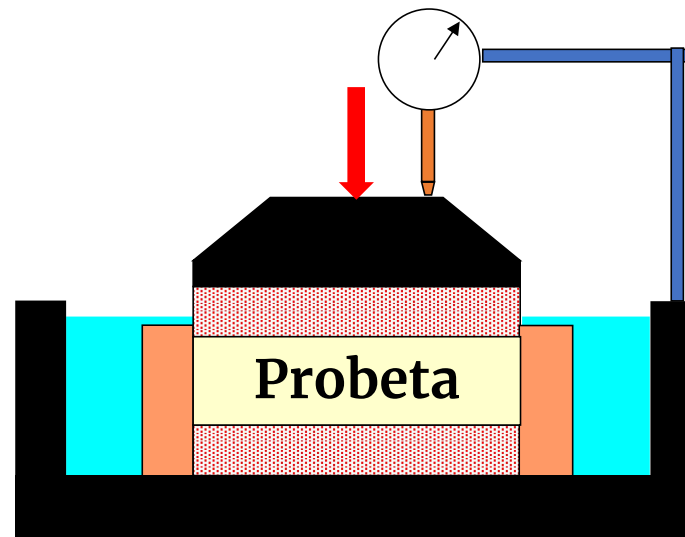
# EXPANSIÓN



**Crítico en Arcillas No Saturadas**

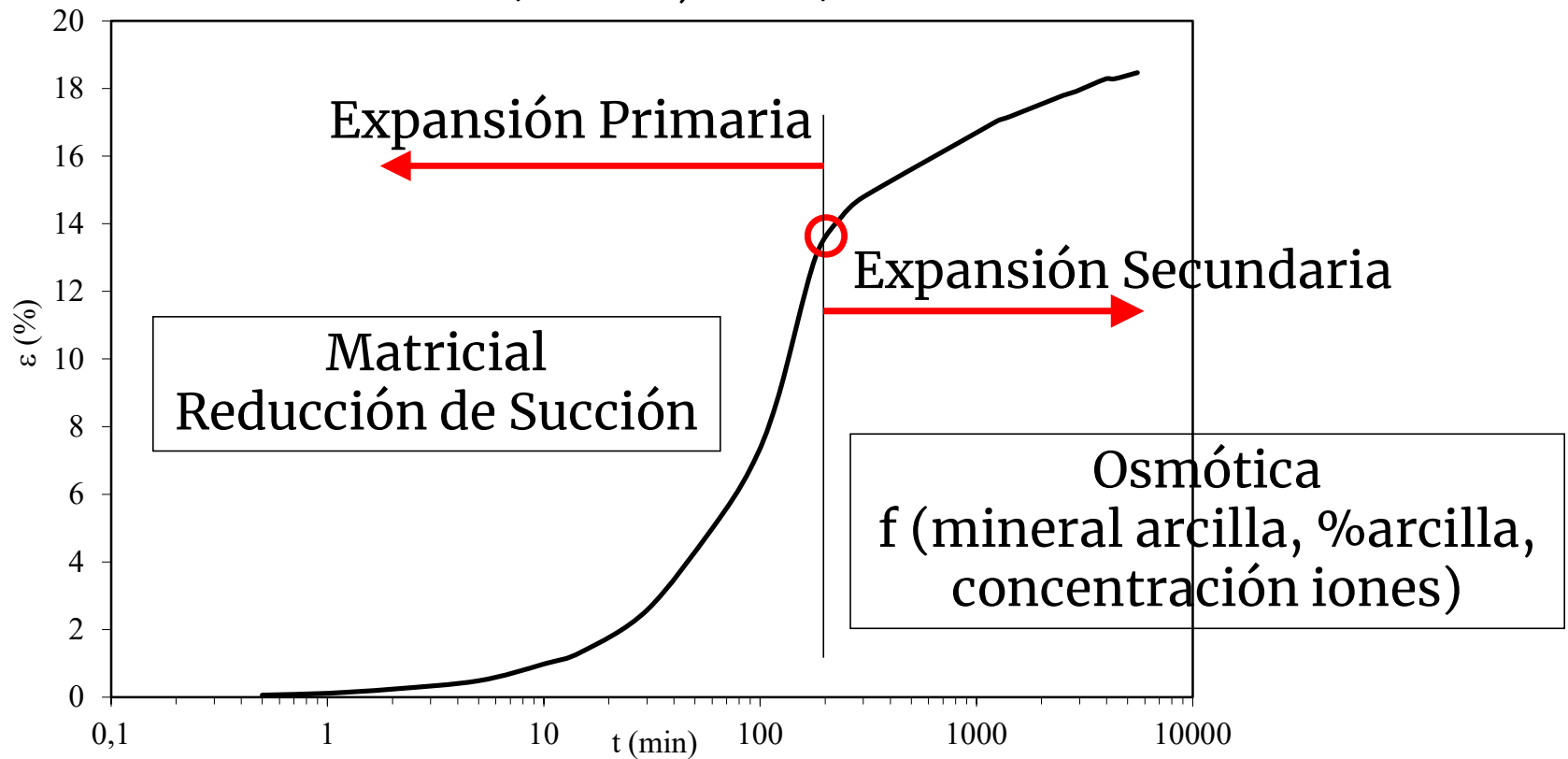
# ENSAYO DE EXPANSIÓN (ASTM D4546)

Expansión Libre  
Presión de Expansión



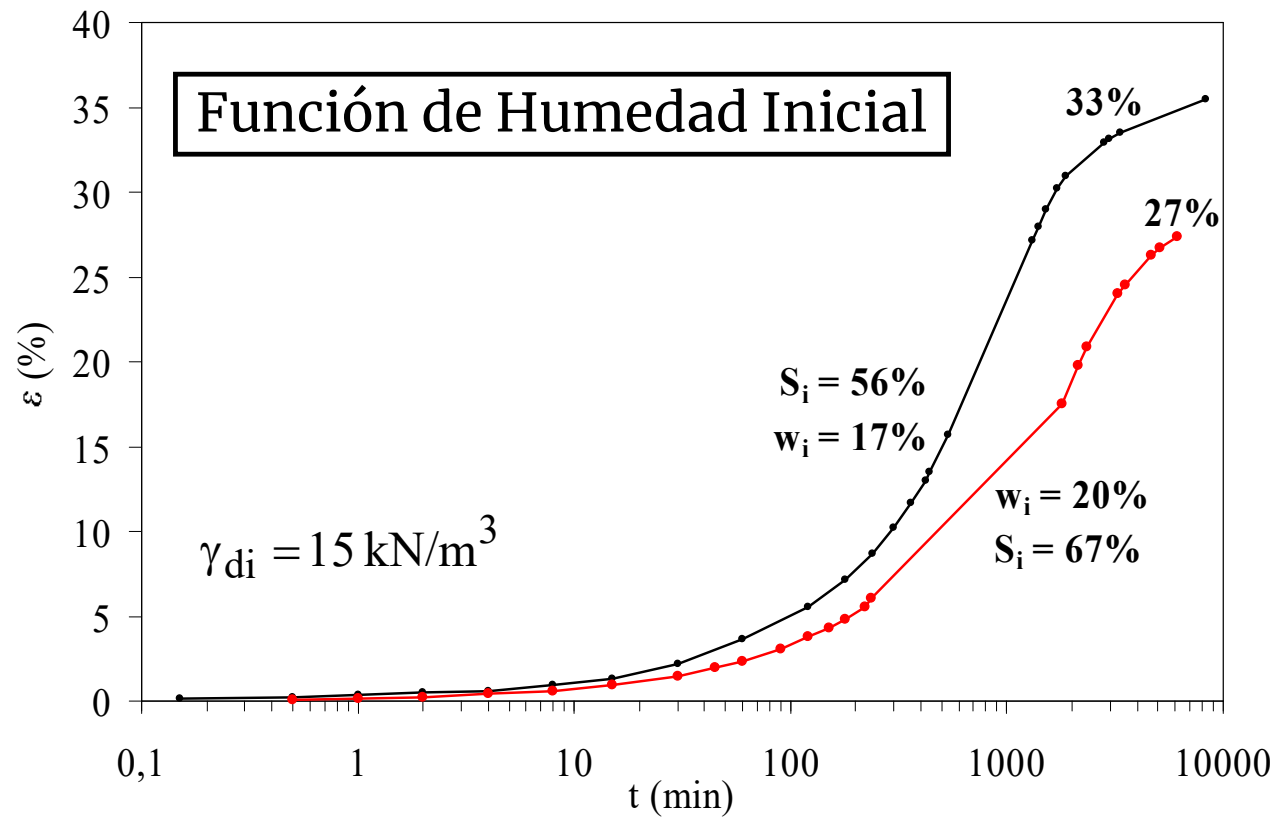
# EXPANSIÓN LIBRE

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



# EXPANSIÓN LIBRE

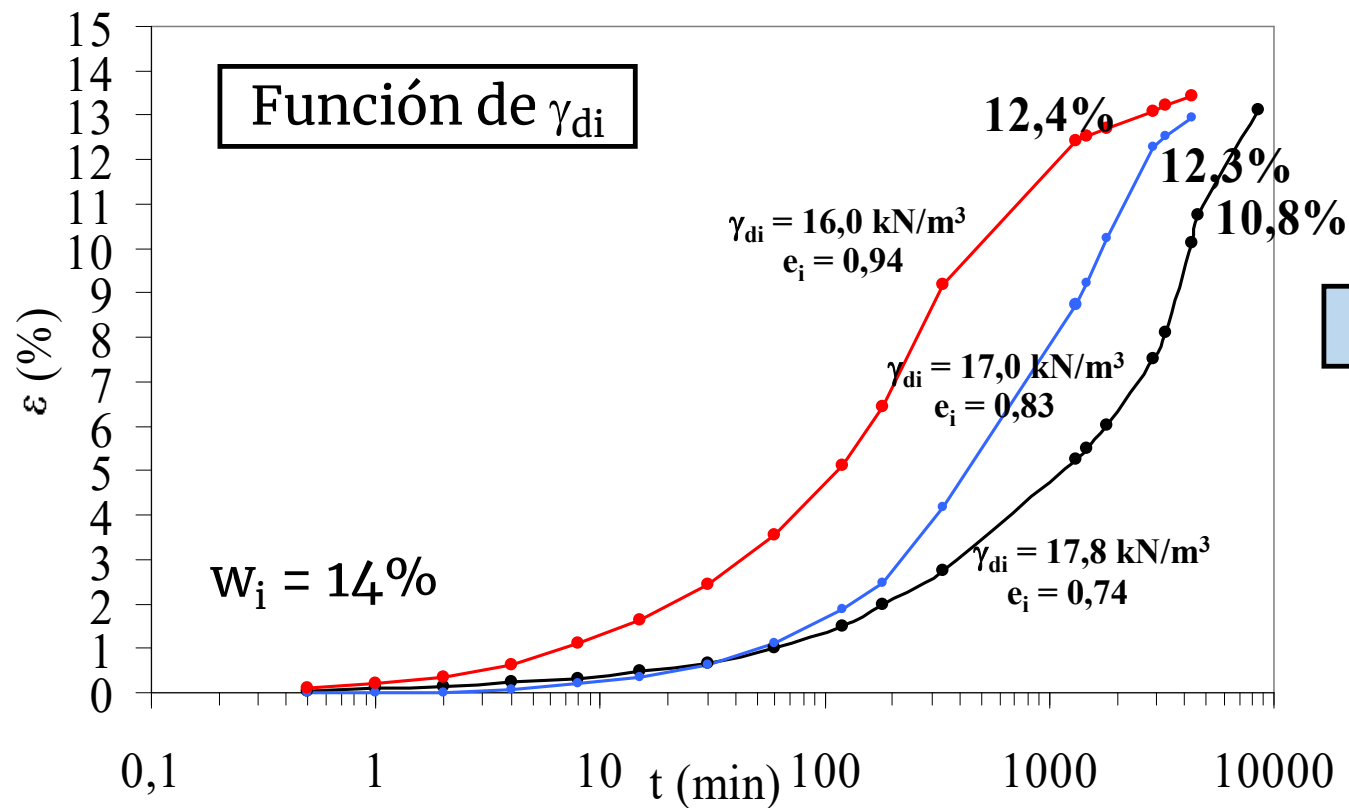
Arcilla Formación Libertad (CH), Ruta 1, 58K800  
(Musso, Rostan & Behak, 2003)





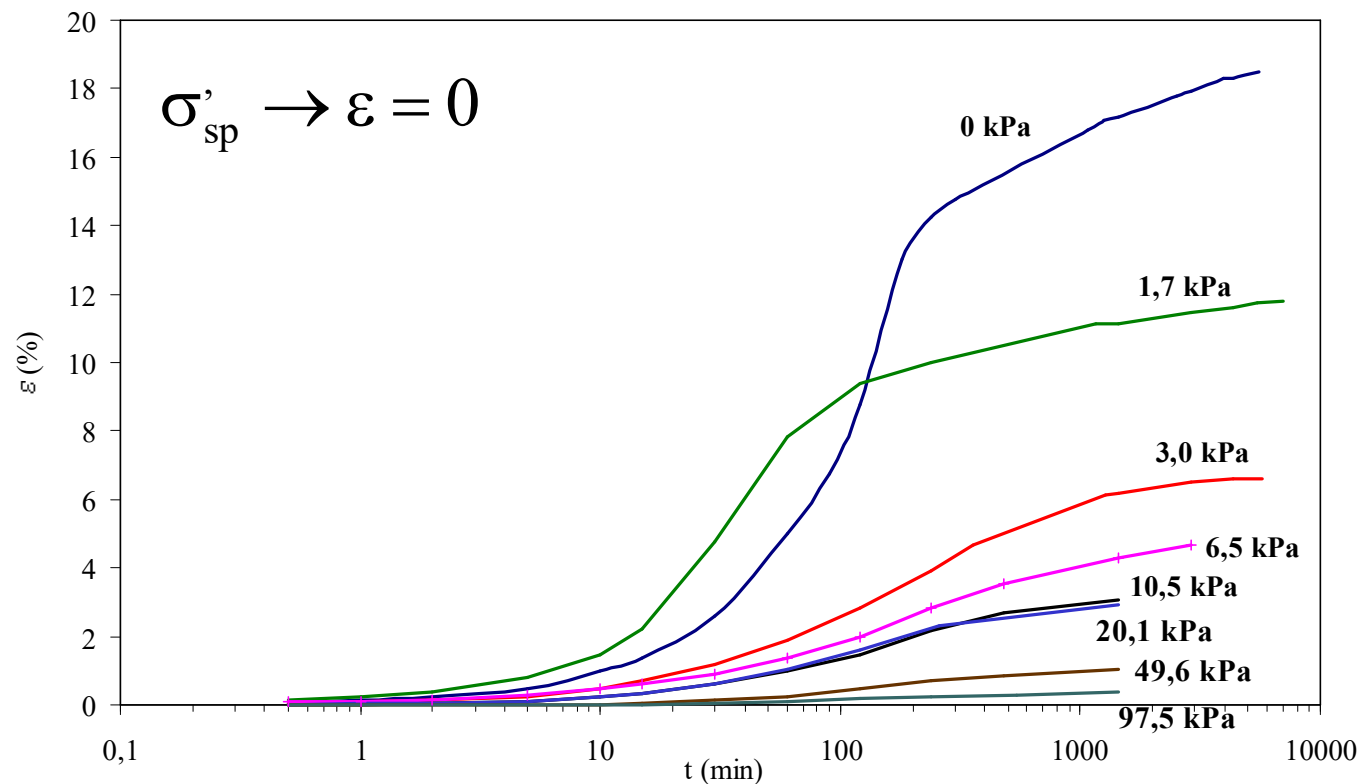
# EXPANSIÓN LIBRE

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



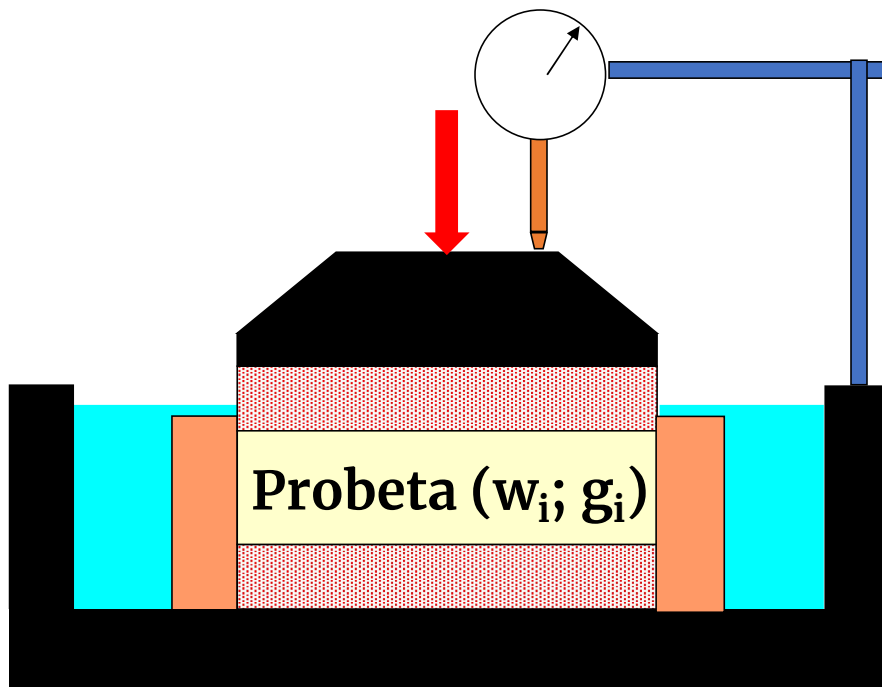
# PRESIÓN DE EXPANSIÓN ( $\sigma'_{sp}$ )

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

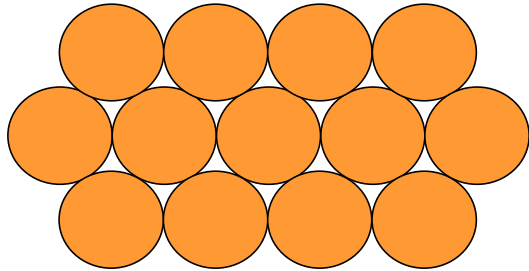
- Incrementar carga hasta obtener  $V = \text{cte}$

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

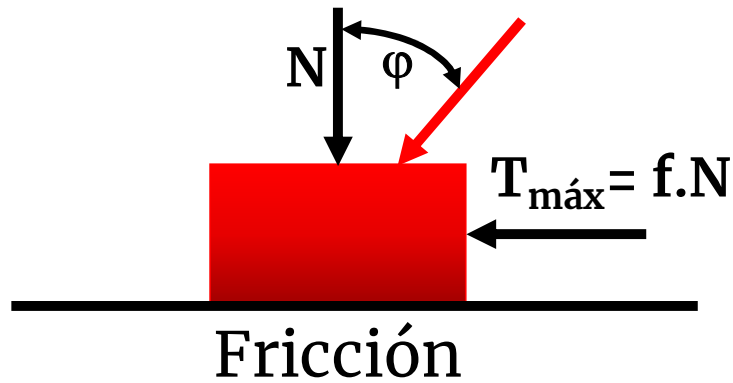
# MÉTODOS INDICATIVOS DE POTENCIAL EXPANSIVO

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

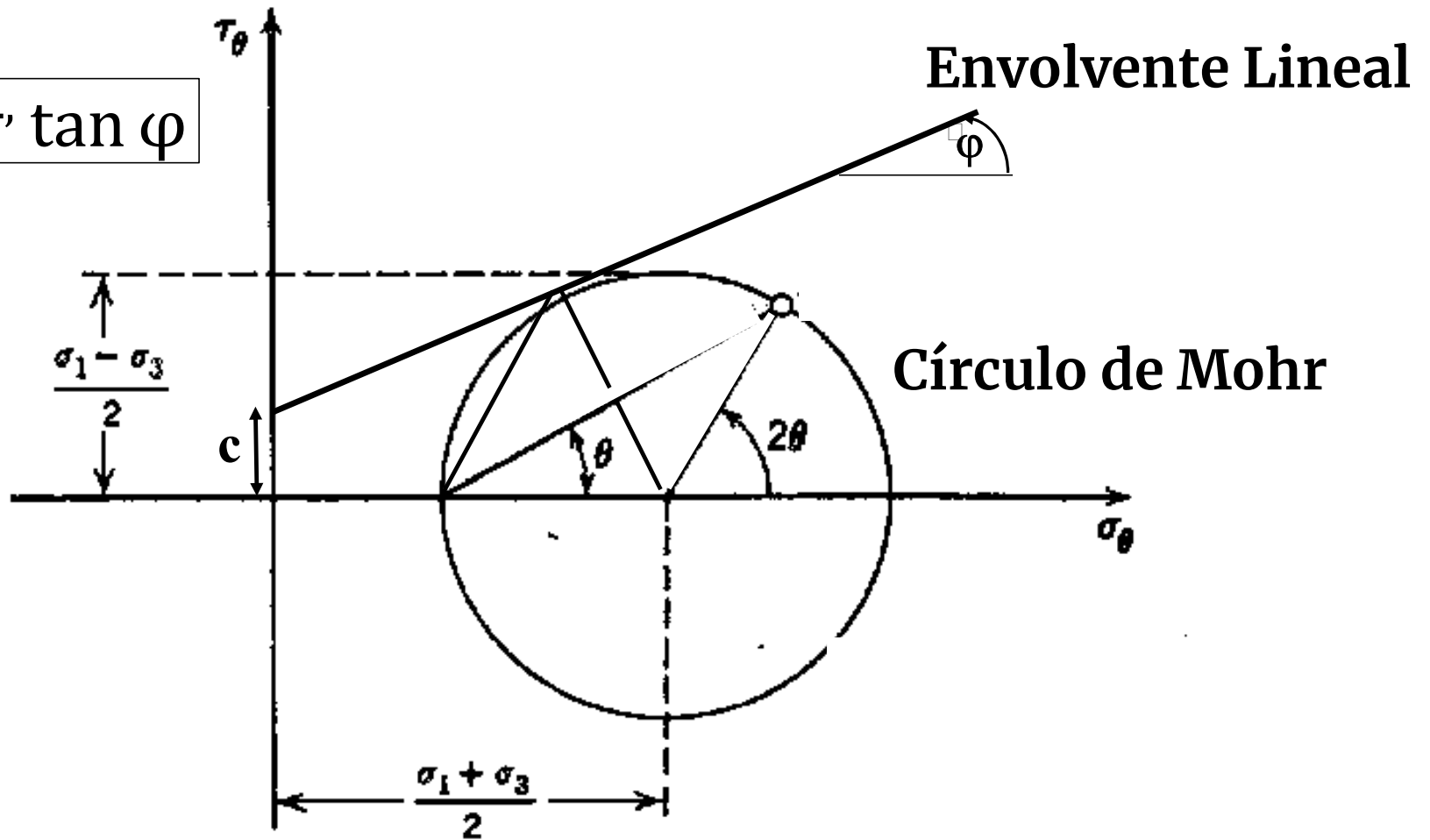


$$T = C + N \tan \varphi$$

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	