

Congreso de Suelos Dispersivos y Sulfatados

Asunción, 24-25/10/19



Sociedad
Paraguaya
de Geotecnia



ASOCIACIÓN PARAGUAYA DE CARRETERAS



COMITÉ
NACIONAL
PARAGUAYO

SUFUSION DE SUELOS

1. DEFINICIÓN DE LA SUFUSION DE SUELOS

2. PARAMETROS Y ENSAYOS DE IDENTIFICACION

3. SUELOS LOESSICOS

4. CONCLUSIONES

SUFUSION DE SUELOS

1. DEFINICIÓN DE LA SUFUSION DE SUELOS

2. PARAMETROS Y ENSAYOS DE IDENTIFICACION

3. SUELOS LOESSICOS

4. CONCLUSIONES

CASOS HISTORICOS



**Caracterización de Suelos Dispersivos
en la Región Occidental del Paraguay
Ruta Nacional N°9 “Dr. Carlos Antonio López”
Río Negro - Kilómetros 71 al 220
Carlos Cruz; Atilio Perazzo**

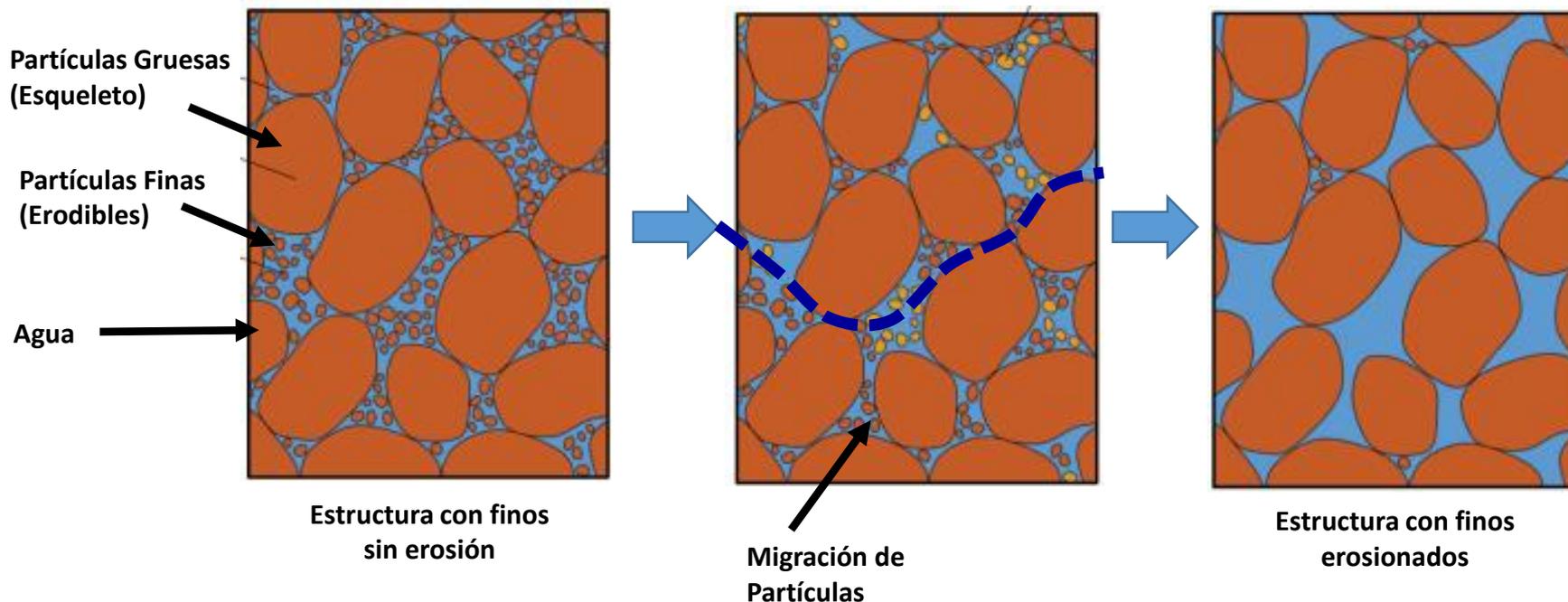
CASOS HISTORICOS



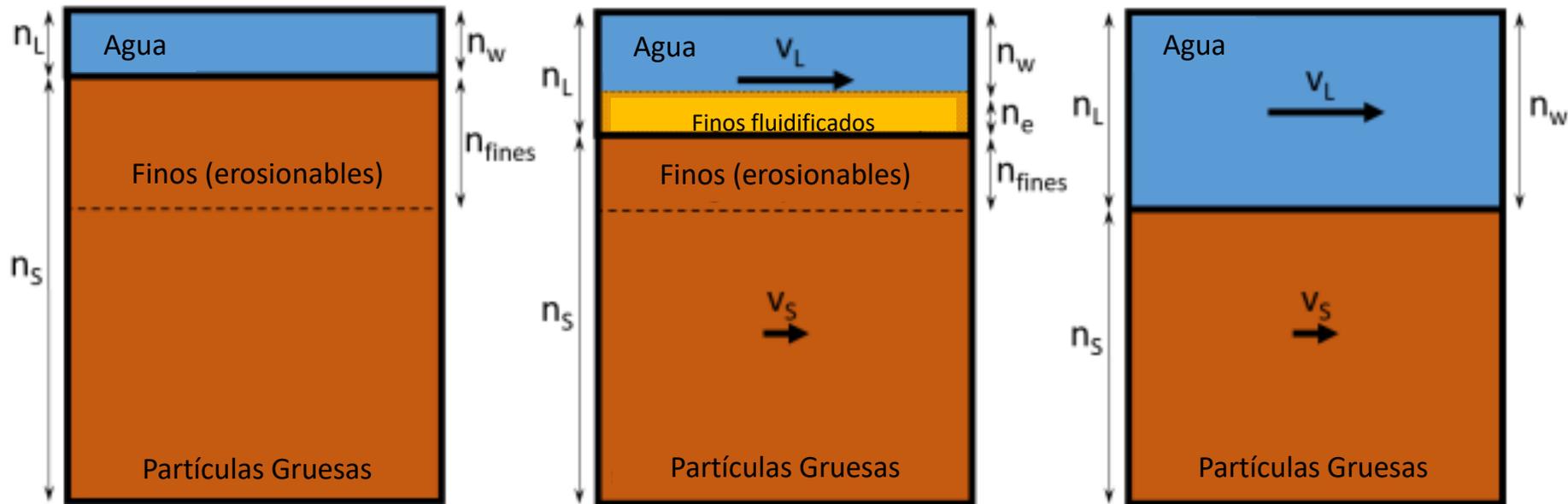
DEFINICION DE SUFUSION (Conceptos)

- Proceso de **migración de partículas “finas” en una estructura de suelo.**
- Generalmente, es atribuido a **material internamente inestable** o, material con discontinuidad granulométrica, o con alta proporción de partículas gruesas.
- **Proceso físico**, puede o no contener un componentes físico.
- El **estado final** del proceso implica:
 - La pérdida de los componentes finos.
 - Potencialmente la inestabilidad estructural.

DEFINICION DE SUFUSION (Mecanismo)



DEFINICION DE SUFUSION (Efectos)



DEFINICION DE SUFUSION (Historia)

Planteo inicial. Suelos internamente inestables. La pérdida de material fino produce aumento en la permeabilidad del material, debilitamiento de la estructura más gruesa o primaria, lo que puede conllevar al colapso de la estructura. Se identificaron accidentes e incidentes graves en presas y terraplenes

Referencias. Kovacs (1981), Kenney and Lau (1984, 1985, 1986), Sun (1989), Burenkova (1993), Skempton y Brogan (1994), Wan y Fell (2008), Indraratna (2001, 2008, 2011)

Objetivo: Identificar factores que definan la potencialidad de sufusión. Conceptos de geotecnia básicos como son la curva de distribución de tamaño de partículas, grado de compactación y los esfuerzos a los cuales va a estar sometido el suelo.

DEFINICION DE SUFUSION (Mecanismo)

Alteración estructural del suelo:

- **Erosión**

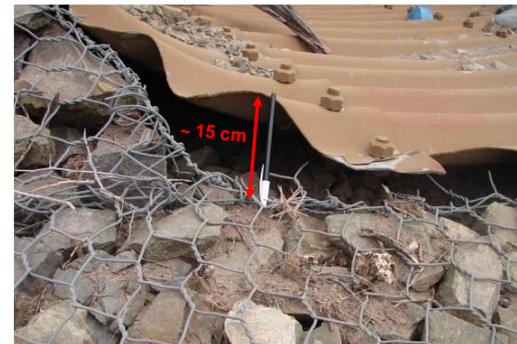
- Partículas de todos los tamaños son arrastradas por las fuerzas de filtración.
- Durante este proceso se pierde gran cantidad de material, lo que puede poner en riesgo la integridad de la estructura.

- **Tubificación**

- Se forman canales, a través del suelo.
- Pasa el agua con material más pequeño que el diámetro del tubo mayor, según el valor de la fuerza de arrastre.



Bom Conselho earth dam (Brazil) breached by overtopping (2010)



1. DEFINICIÓN DE LA SUFUSION DE SUELOS

2. PARAMETROS Y ENSAYOS DE IDENTIFICACION

3. SUELOS LOESSICOS

4. CONCLUSIONES

DEFINICION DE SUFUSION (Control de la Migración)

Control de Migración (Ley de Filtros)

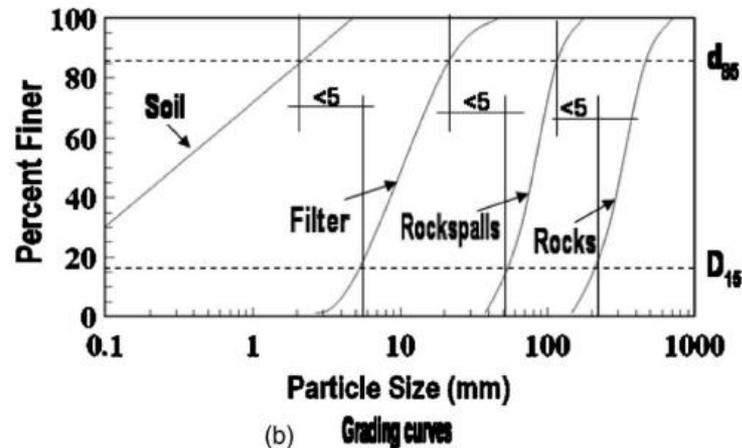
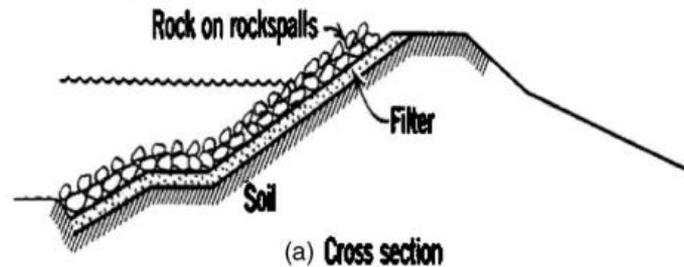
Terzaghi y Peck (1948)

- **ESTABILIDAD.** Capacidad de retención de materiales finos.

$$D_{15f} < d_{85b}$$

- **PERMEABILIDAD.** Permitir el movimiento “libre” del agua.

$$D_{15f} > d_{15b}$$



DEFINICION DE SUFUSION (Control de la Migración)

Control de Migración (Ley de Filtros)

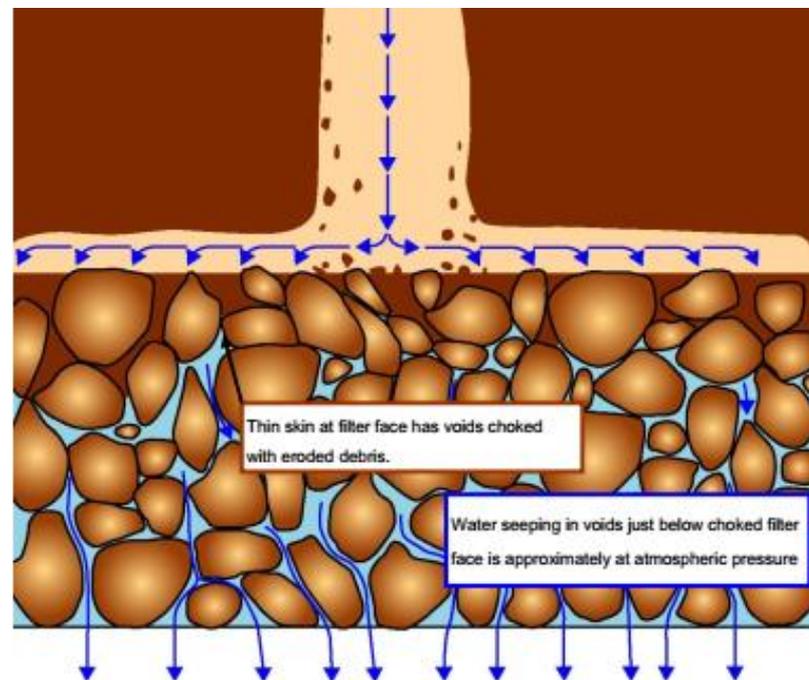
Terzaghi y Peck (1948)

- **ESTABILIDAD.** Capacidad de retención de materiales finos.

$$D_{15f} < d_{85b}$$

- **PERMEABILIDAD.** Permitir el movimiento “libre” del agua.

$$D_{15f} > d_{15b}$$



DEFINICION DE SUFUSION (Control de la Migración)

Suelo Base	1	2A	3	4A.
Contenido finos	≥85%	35-85%	<15%	15-35%
Criterio Sherard y Dunningan (89)	$D_{15f} \leq 9 d_{85B}$	$D_{15f} \leq 0,7 \text{ mm}$	$D_{15f} \leq 4 d_{85B}$	$D_{15f} = \frac{40 - \% \#200}{40 - 15} \cdot (4D_{85B} - 0,70) + 0,70$
Rango de D_{15f} para que no erosione	6,4 a 13.5 d_{85B}	0,7 a 1.7 mm	6,8 a 10.0 D_{85B}	1,6 D_{15f} a 2.5 D_{15f} del criterio de diseño de Sherard y Dunningan
Criterio para que no erosione	$D_{15f} \leq 9 d_{85B}$	$D_{15f} \leq 0,7 \text{ mm}$	$D_{15f} \leq 7 D_{85B}$	$D_{15f} \leq 1.6D_{15fd},$ $D_{15fd} = \frac{35 - \% \#200}{35 - 15} \cdot (4D_{85B} - 0,70) + 0,70$

IDENTIFICACION DE SUFUSION

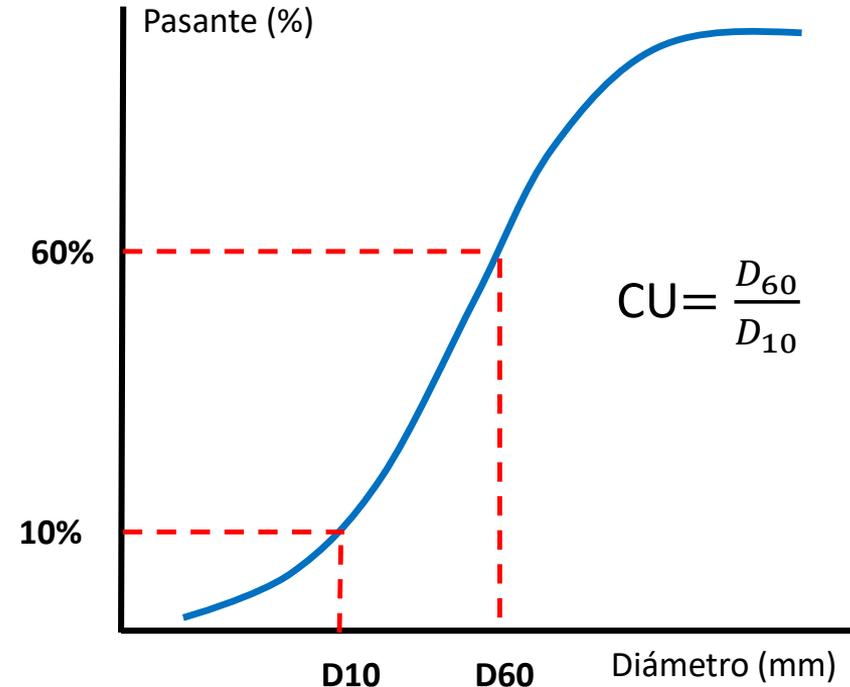
- **USACE (1953)**

Ensayos de filtración sobre suelos base con diferentes combinaciones de filtros no cohesivos de grava y arena.

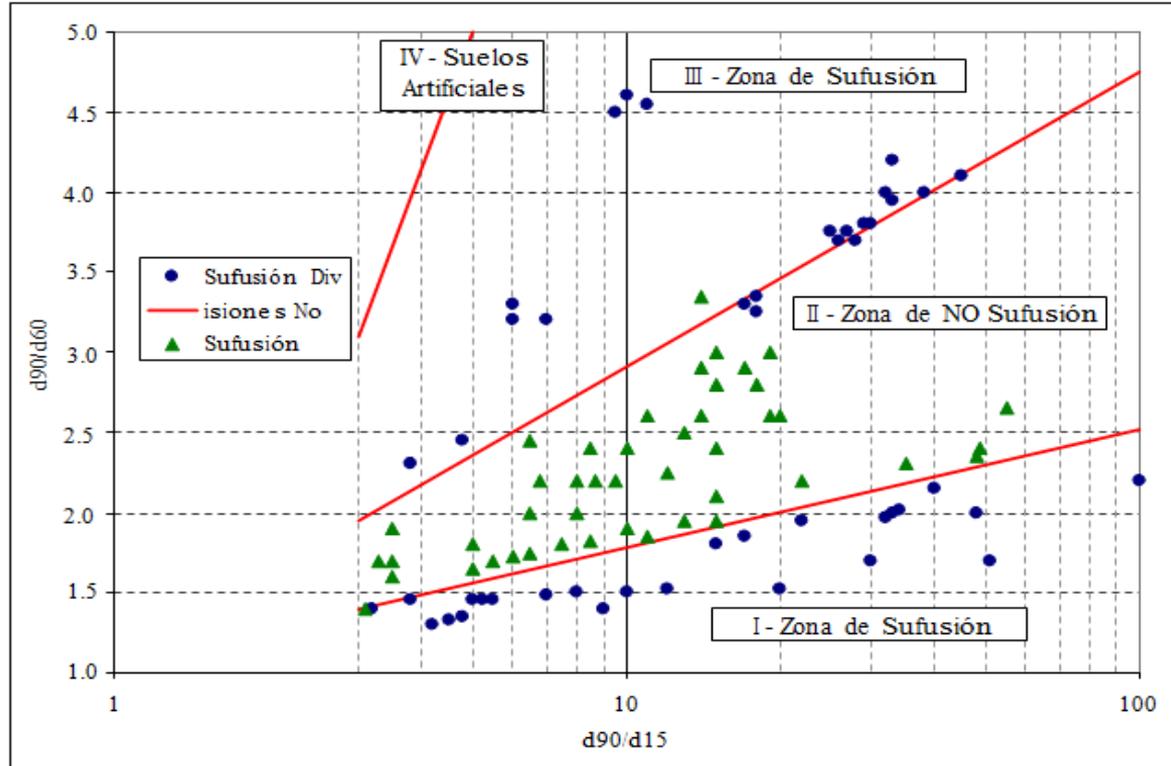
La sufusión ocurre cuando se presentan condiciones de flujo turbulento y gradientes hidráulicos mayores a 5 con coeficientes de uniformidad $CU > 20$.

- **Isotomina (1957)**

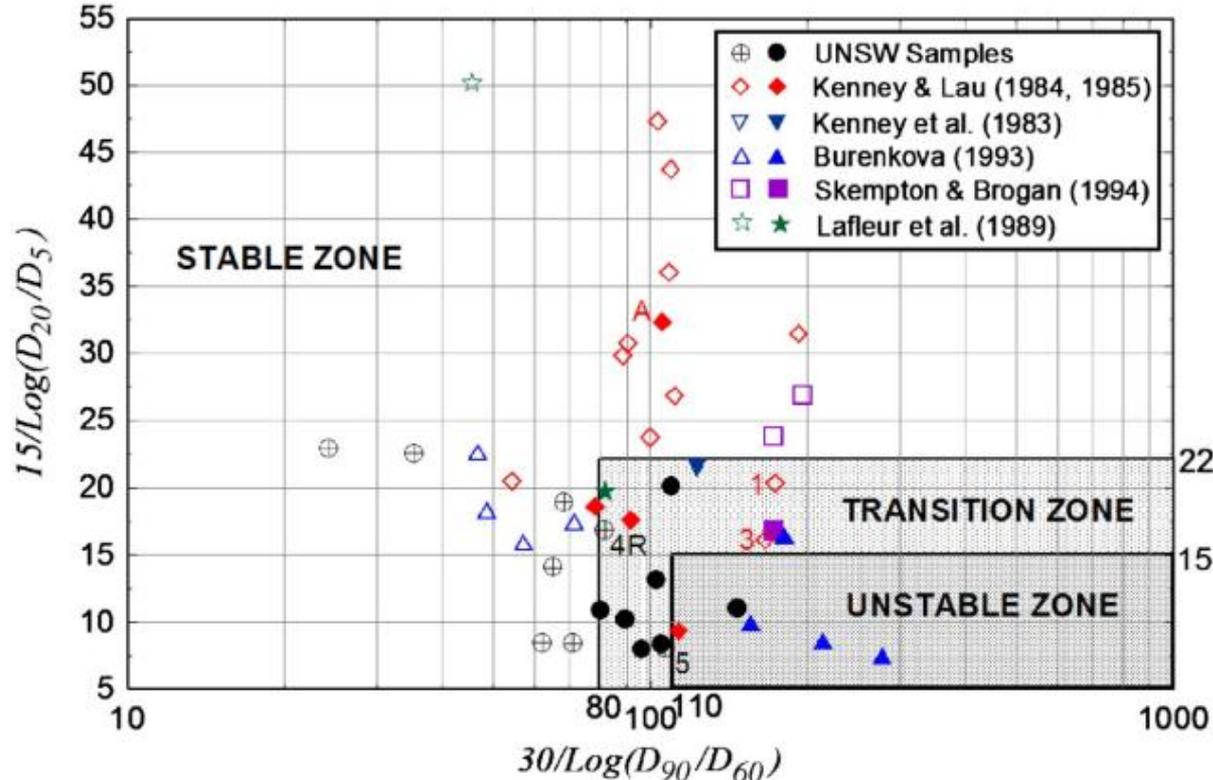
- No hay sufusión si $C_u < 10$,
- Transición de Sufusión si $10 \leq C_u \leq 20$ y
- Sufusión leve si $C_u > 20$



IDENTIFICACION DE SUFUSION



IDENTIFICACION DE SUFUSION



IDENTIFICACION DE SUFUSION

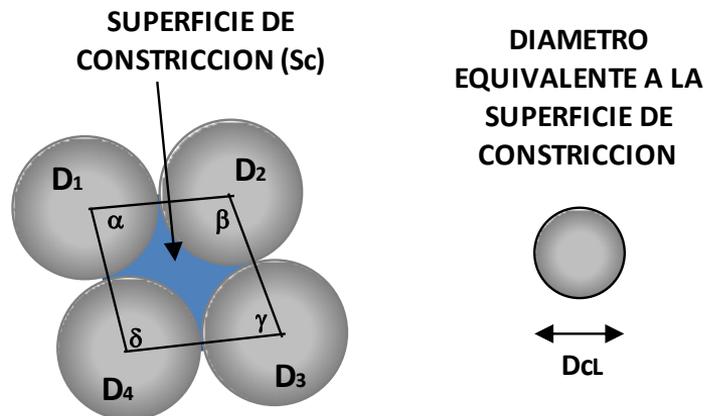
FACTORES DE INFLUENCIA. Fell et al. (2005):

- La existencia de una corriente de flujo dominante a partir de una fuente de provisión de agua.
- El material afectado por la corriente de agua, debe ser erodible, y debe ser arrastrado por la corriente de agua.
- Debe existir una vía de salida del material erosionado, no suficientemente bien controlada.
- Cuando se forma una tubificación, el material contribuye al desarrollo del tubo, formando una cavidad de circulación.

IDENTIFICACION DE SUFUSION (Auto erodabilidad)

INDRARATNA et al, 2011

Se basa en establecer un Diámetro de
Constricción (DcL)

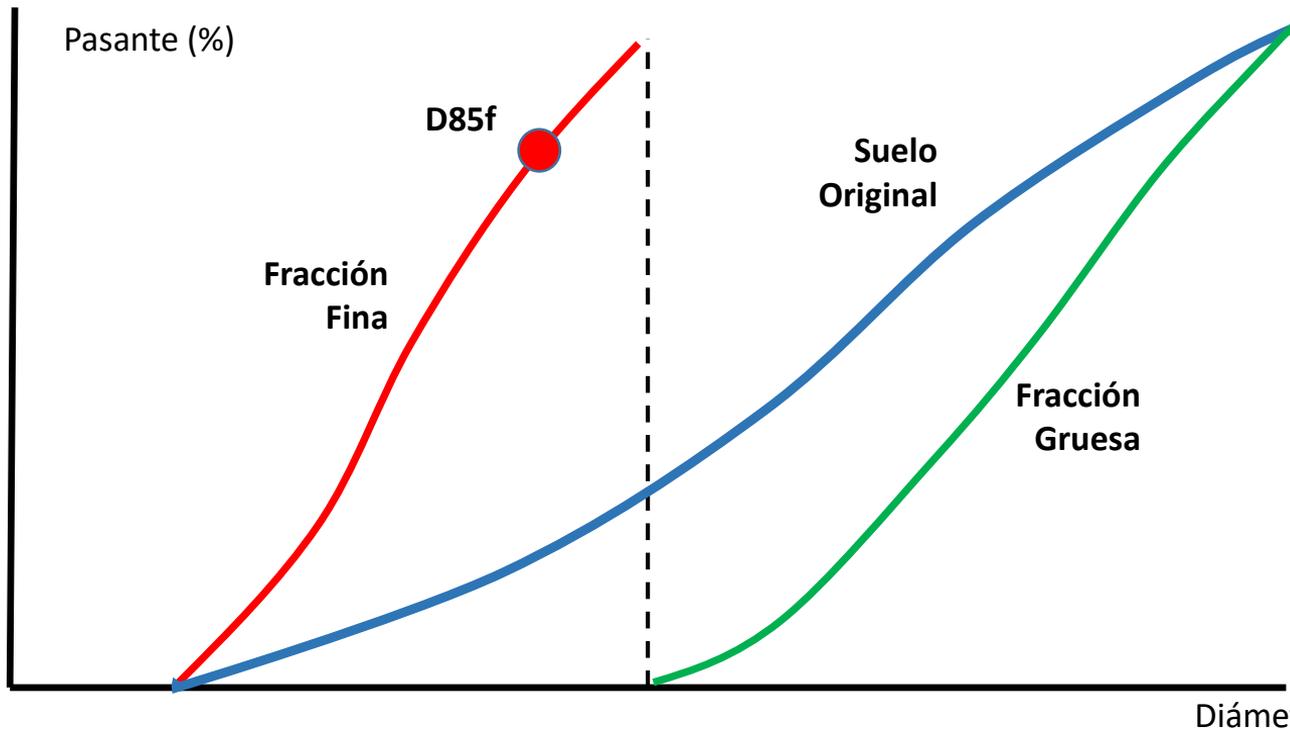


$$Sc = \frac{1}{8} \left[(D_1 + D_2)(D_1 + D_4) \cdot \text{sen}(\alpha) + (D_2 + D_3)(D_2 + D_4) \cdot \text{sen}(\gamma) - (\alpha \cdot D_1^2 + \beta \cdot D_2^2 + \gamma \cdot D_3^2 + \delta \cdot D_4^2) \right]$$

$$D_{cL} = \sqrt{\frac{4 \cdot Sc_{\max}}{\pi}}$$

D35,c = “Condición de control”

IDENTIFICACION DE SUFUSION



INDRARATNA et al, 2011

$D_{c35}^c > 0,82 d_{f85}$ inestable.

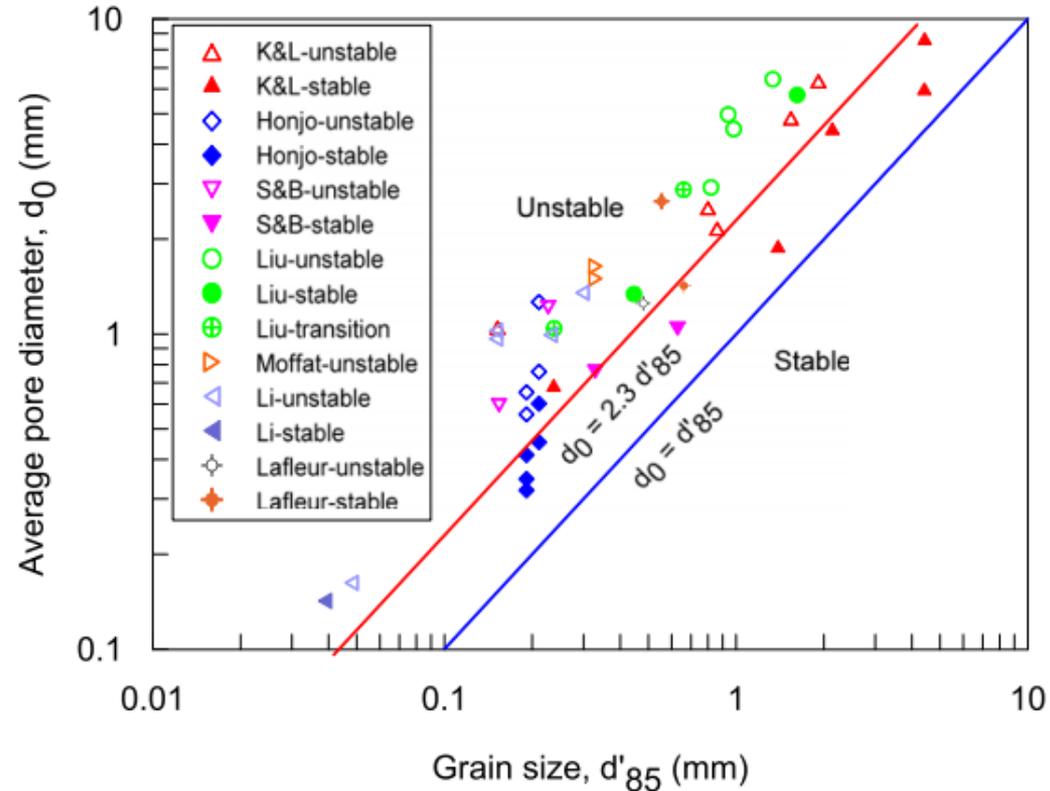
$D_{c35}^c < 0,73 d_{f85}$ estable

LI Y FANNI, 2013

$d_o > 2,3 d'_{85}$ inestable

$d_o < 1,0 d'_{85}$ estable

IDENTIFICACION DE SUFUSION



IDENTIFICACION DE SUFUSION

SUFUSION EN SUELOS INTERNAMENTE INESTABLES. Wan y Fell (2008) :

- Los suelos poseen una estructura que permite la identificación de un sistema primario de partículas (es decir, fracción más gruesa), el cual es el responsable de la transferencia de los esfuerzos,
- Las partículas sueltas (es decir, la fracción más fina), tiende a ocupar los vacíos formados por el sistema principal,
- Las partículas más finas del suelo presentan dimensiones menores que el tamaño de los vacíos de la estructura primaria, y
- El flujo es capaz de llevar a estas partículas menores a lo largo del sistema de vacíos.

IDENTIFICACION DE SUFUSION

ENSAYOS MECANICOS DE CONTROL DE EROSION:

- a. Erosión de chorro, (Chevalier et al., 2010),
- b. Erosión superficial medida (Briaud et al. 2001),
- c. Erosión en canal de descarga y ensayos con bomba de flujo (Reddi et al. 2000),
- d. Dispositivos de cilindro, similar la celda triaxial (Bendahmane et al., 2008); y
- e. Ensayos de erosión en agujero (Hole Erosion Test, HET) desarrollados para estudiar las características de la erosión del suelo en las grietas de las presas de terraplén (Wan y Fell, 2008) e inspirado en el ensayo pin-hole (ASTM 2006).

IDENTIFICACION DE SUFUSION (Erosión y Migración de Sólidos)

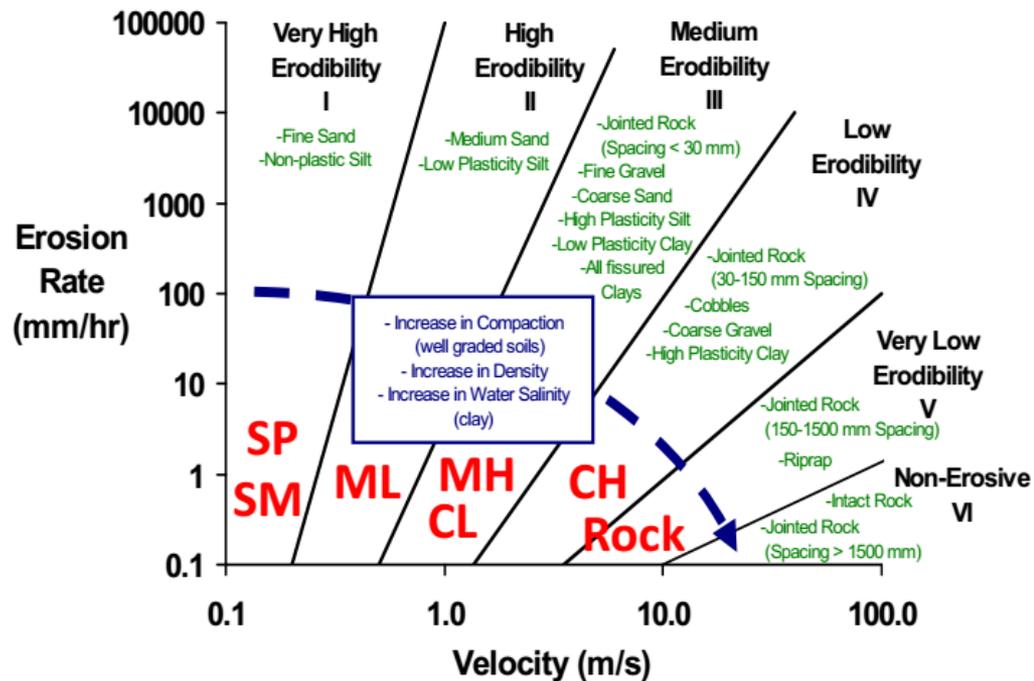
$$z' = f(\tau)$$

$$\frac{z'}{u} = \alpha \left(\frac{\tau - \tau_c}{\rho u^2} \right)^m + \beta \left(\frac{\Delta \tau}{\rho u^2} \right)^n + \delta \left(\frac{\Delta \sigma}{\rho u^2} \right)^p$$

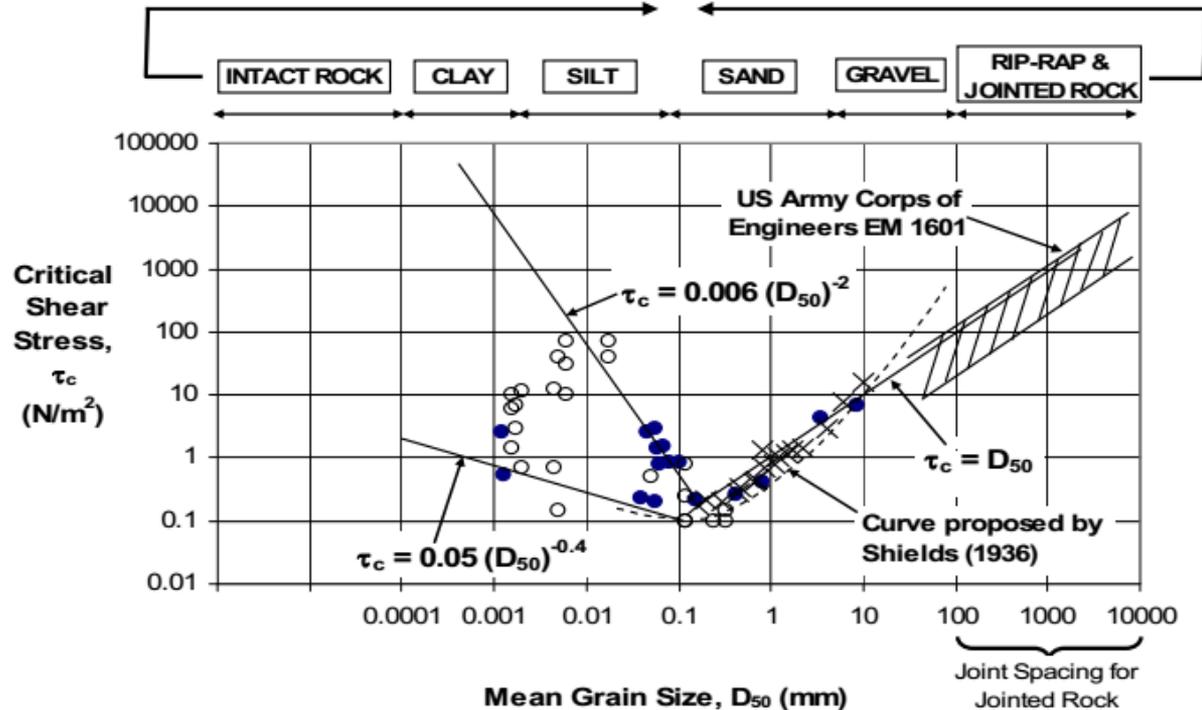
Componente por esfuerzo de corte

Componente turbulencia por corte

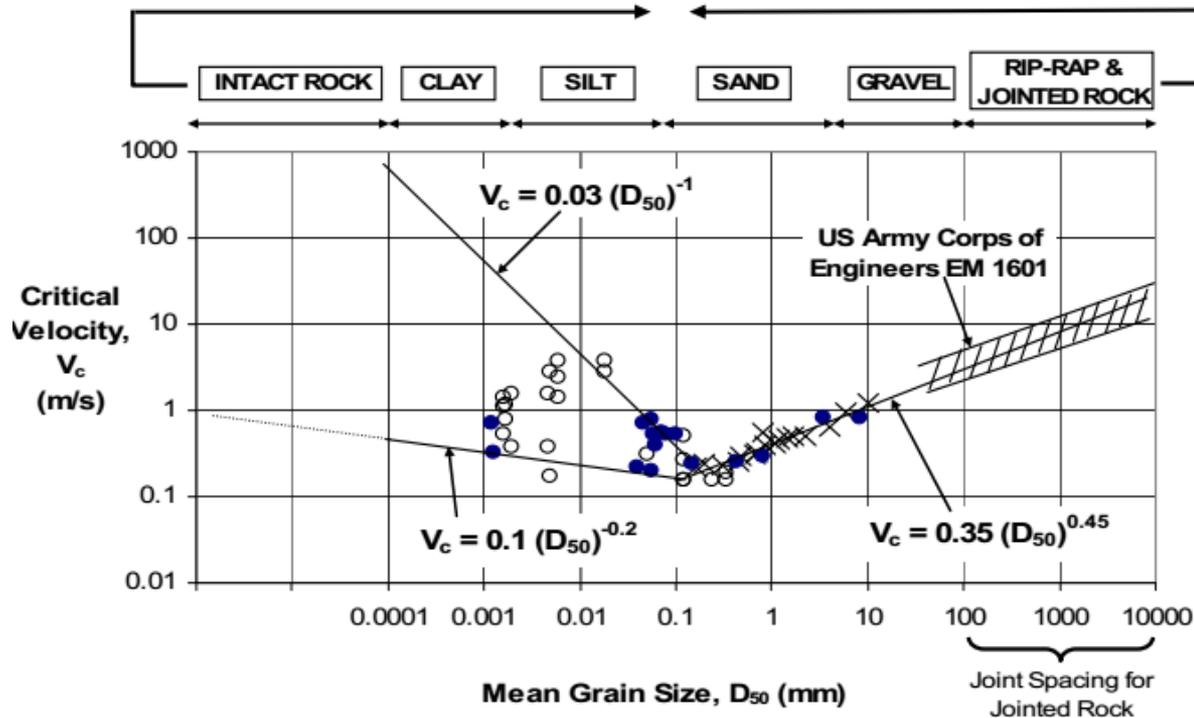
Componente turbulencia por normal



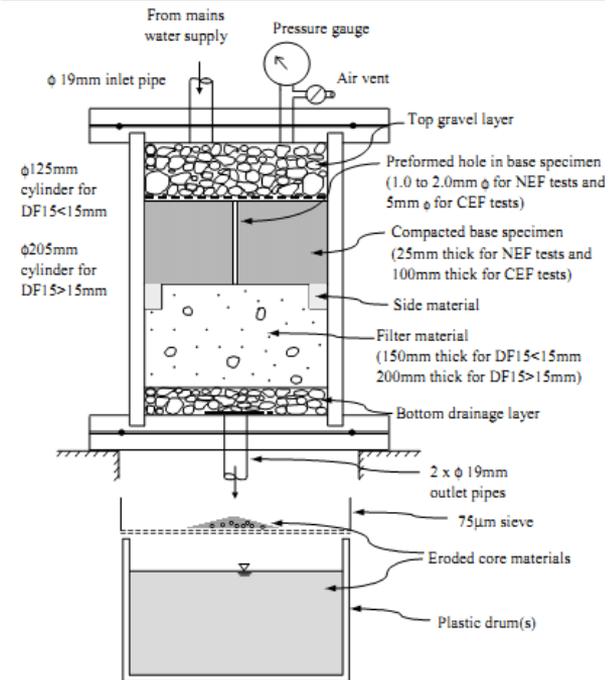
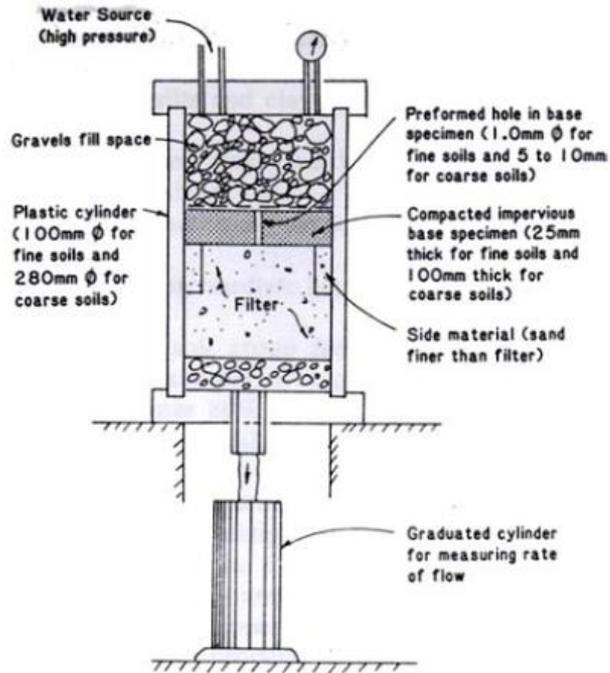
IDENTIFICACION DE SUFUSION (Erosión y Migración de Sólidos)



IDENTIFICACION DE SUFUSION (Erosión y Migración de Sólidos)



ENSAYOS DE SUFUSION

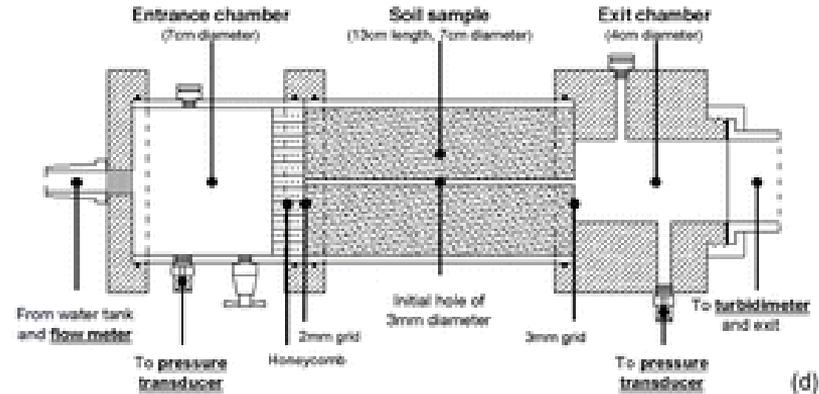
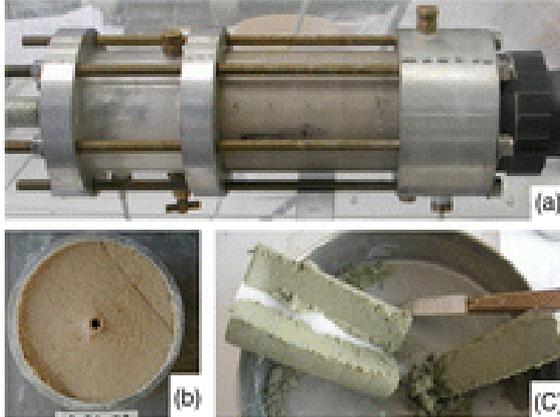


NEF test apparatus (after Sherard and Dunnigan, 1989)

CEF test apparatus

Foster y Fell, 1999

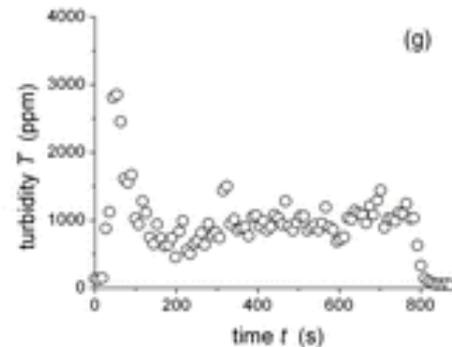
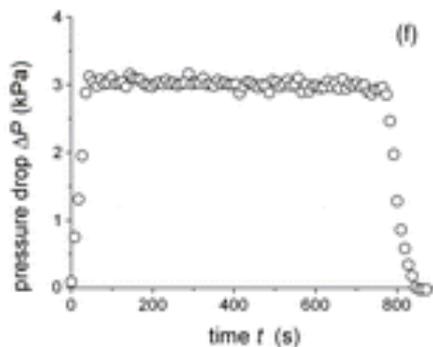
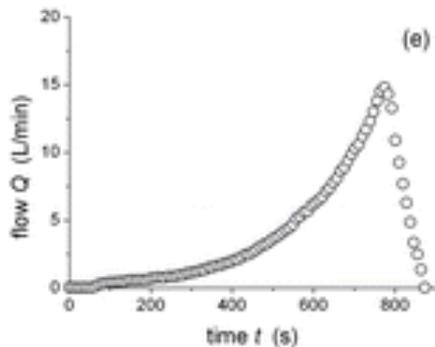
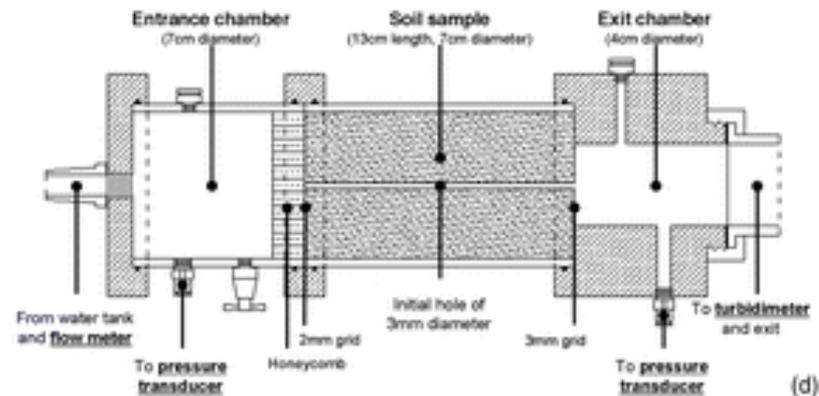
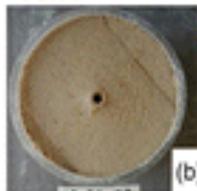
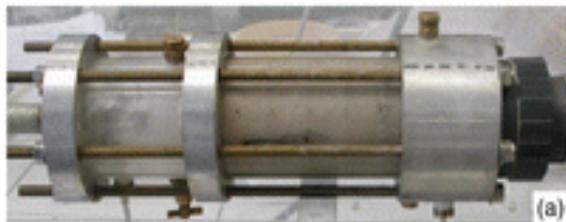
ENSAYOS DE SUFUSION



$$\tau = \frac{\rho_w \cdot g \cdot i \cdot \theta_t}{4}$$

- ρ_w , peso unitario del fluido;
- g , aceleración de la gravedad;
- i , gradiente hidráulico y
- θ_t , diámetro medio del orificio de filtración.

ENSAYOS DE SUFUSION



ENSAYOS DE SUFUSION

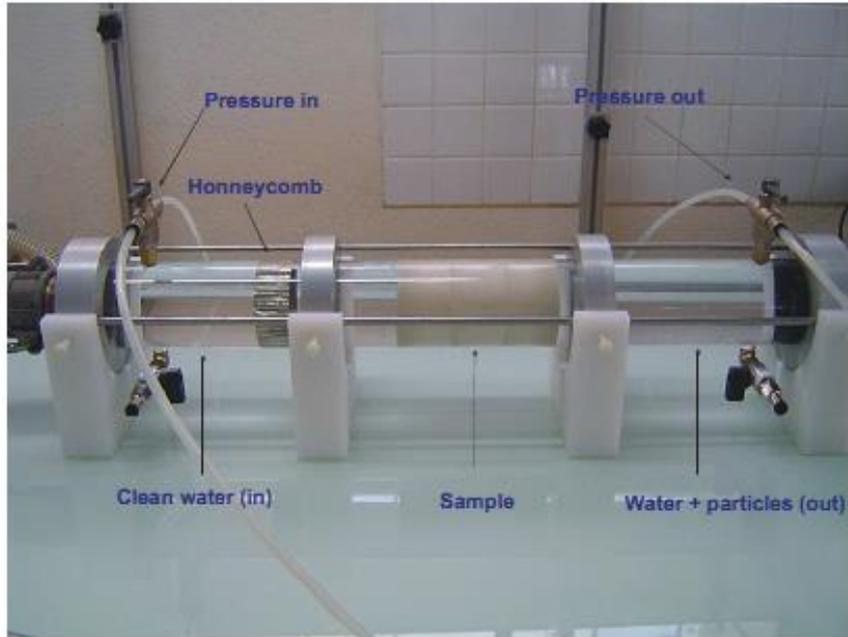


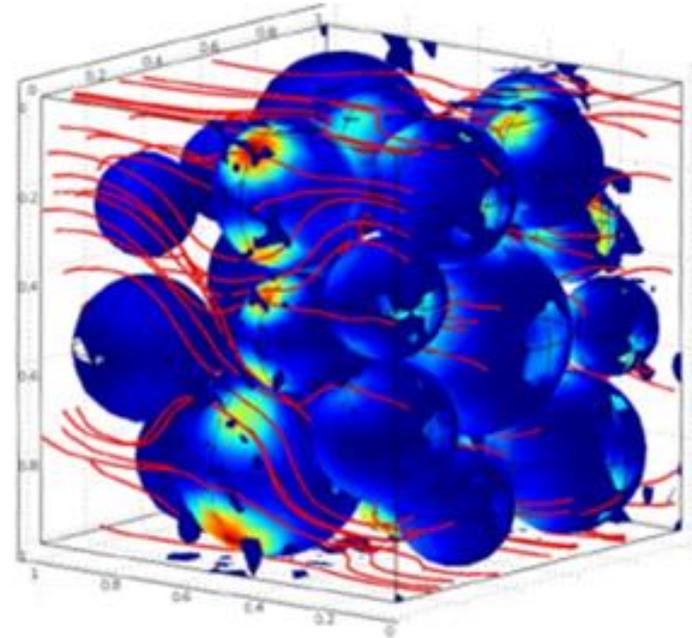
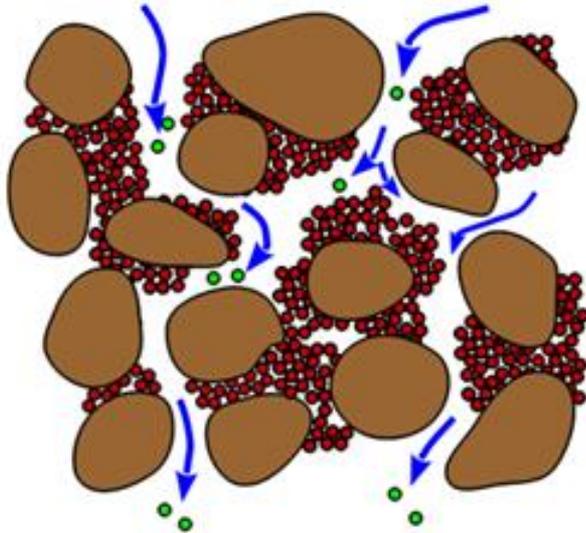
Fig. 3. The Hole Erosion Test device developed by CEMAGREF

FACTORES DE INFLUENCIA DE SUFUSION

1. Contenido de agua en el suelo.
2. Peso Unitario del suelo.
3. Índice de plasticidad del suelo.
4. Resistencia al corte no drenada (S_u).
5. Relación de vacíos (e).
6. Expansividad del suelo.
7. Tamaño medio de las partículas (D_{50}).
8. Pasante del tamiz 200
9. Tipología de arcillas.
10. Grado de dispersividad.
11. Cantidad de cationes intercambiables.
12. Relación de absorción de Na
13. PH del suelo.
14. Temperatura del suelo.
15. Temperatura del agua.
16. Salinidad del agua.
17. PH del agua.

MODELACION DE LA SUFUSION

Método acoplado DEM-PFV



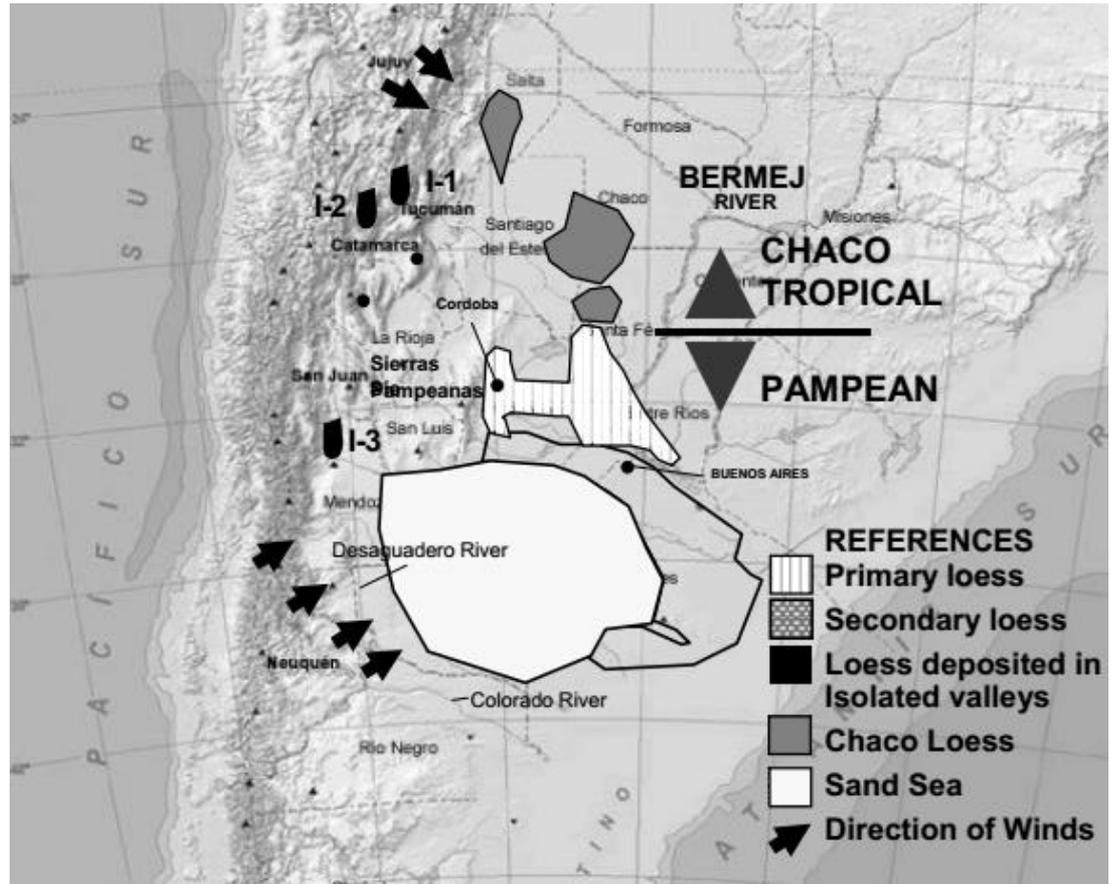
1. DEFINICIÓN DE LA SUFUSION DE SUELOS

2. PARAMETROS Y ENSAYOS DE IDENTIFICACION

3. SUELOS LOESSICOS

4. CONCLUSIONES

CARACTERIZACION

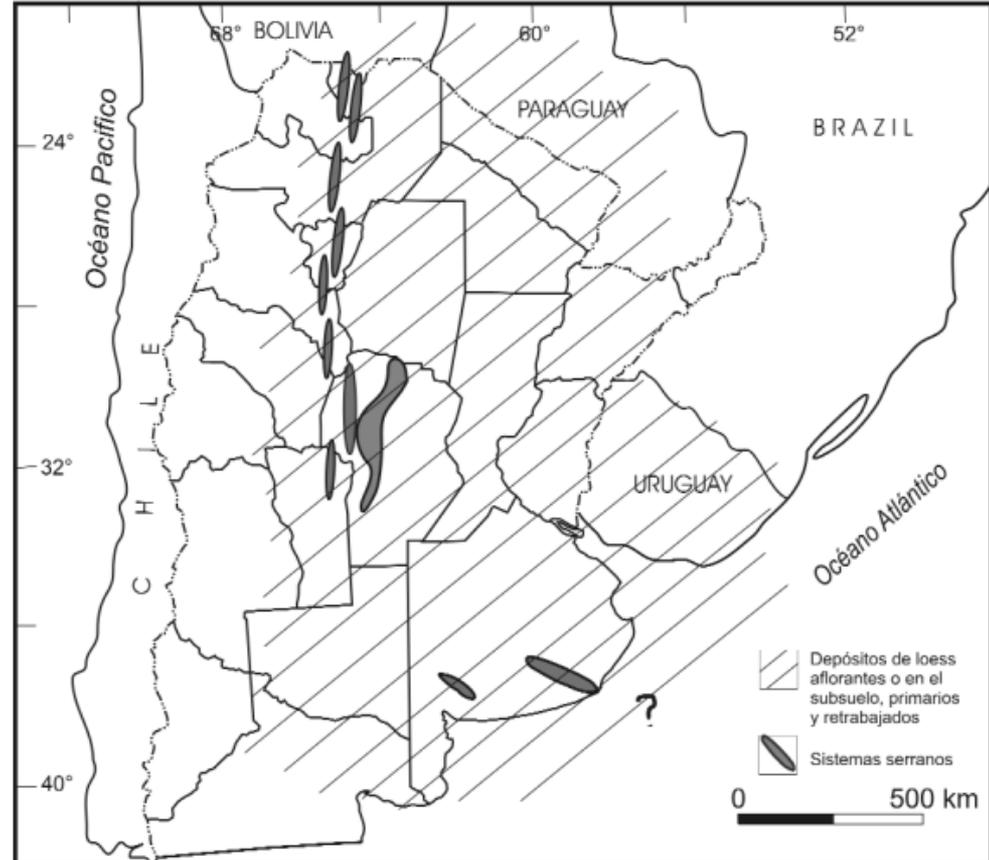


CARACTERIZACION

- Se encuentran dispuestos entre los 23°S y 41°S
- Buenos Aires y parte de su plataforma continental, La Pampa, San Luis, Santiago del Estero, Córdoba, Tucumán, Chaco, Santa Fe, Entre Ríos y
- Parte de las repúblicas de Bolivia, Paraguay y Uruguay

(Teruggi 1957, Sayago 1995, Iriondo 1990, 1997, Zárate 2003, entre otros)

E. FUCKS y C. M. DESCHAMPS, 2008

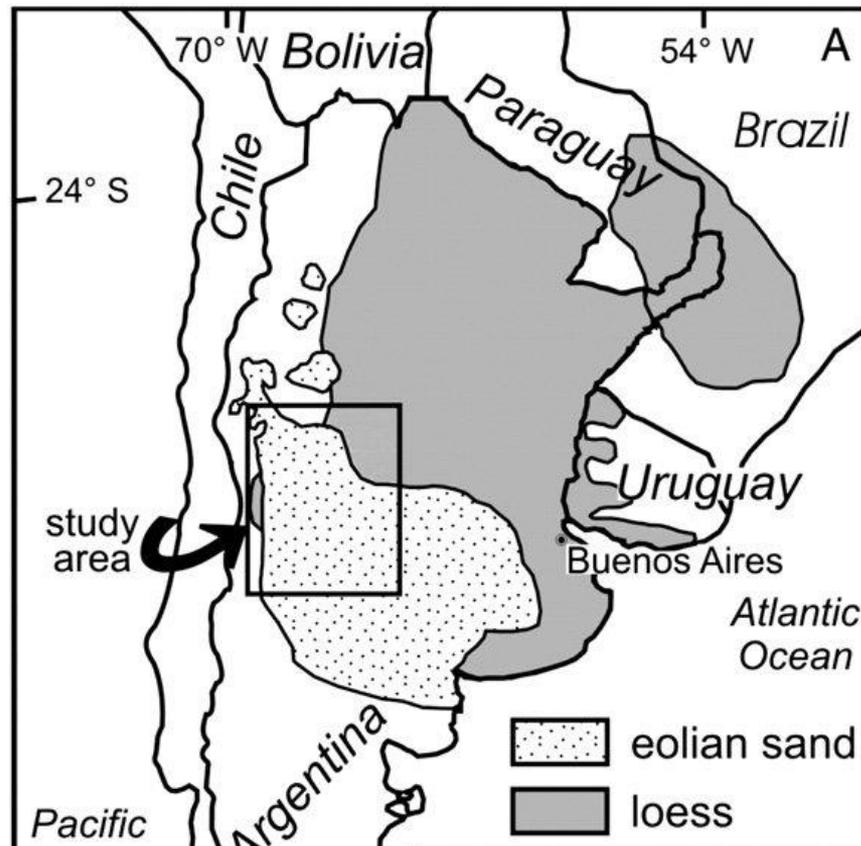


CARACTERIZACION

- Se encuentran dispuestos entre los 23°S y 41°S
- Buenos Aires y parte de su plataforma continental, La Pampa, San Luis, Santiago del Estero, Córdoba, Tucumán, Chaco, Santa Fe, Entre Ríos y
- Parte de las repúblicas de Bolivia, Paraguay y Uruguay

(Teruggi 1957, Sayago 1995, Iriondo 1990, 1997, Zárate 2003, entre otros)

Zarate, 2003



CARACTERIZACION

Propiedad	Valor
Humedad natural (w), (%)	12,7 - 20,7
Peso unitario seco (γ_d), (kN/m ³)	12,3
Gravedad específica (Gs)	2,65
Límite líquido (w_l), (%)	24,4
Límite Plástico (w_p), (%)	21,0
Índice plástico (IP), (%)	3,4
Partículas < 4,50 mm, (%)	100,0
Finos < 0,075 mm, (%)	93,4
Arcilla < 0,002 mm, (%)	14,0

Clasificación USCS

ML

Range of mineral components for the different fraction (from Sagayo et al, 2001).

<i>Particle Size</i>	<i>Mineral</i>	<i>Percent by Weight (%)</i>
Sand	Quartz	20 –30
	Feldspar	20-65
	Volcanic Glass	1-25
	Basalt	1-25
Silt	Quartz	20-30
	Feldspar	30
	Volcanic Glass	15-60
	Gypsum	20
Clay	Illite	90-100
	Montmorillonite	0-5
	Kaolinite	0-5

CARACTERIZACION

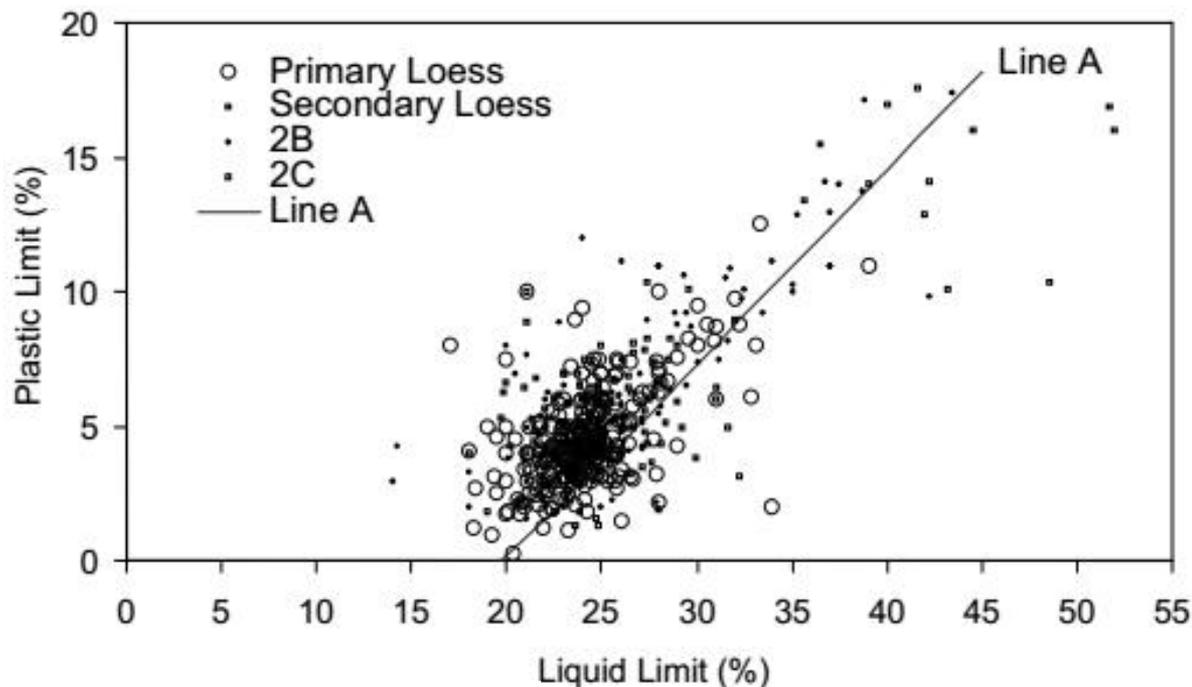


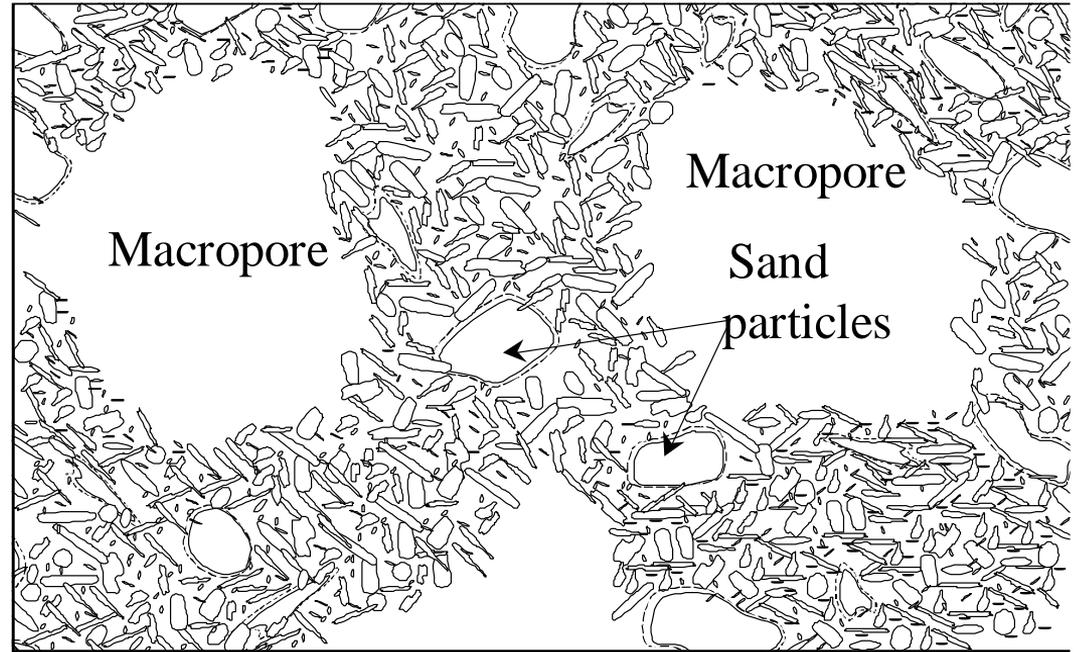
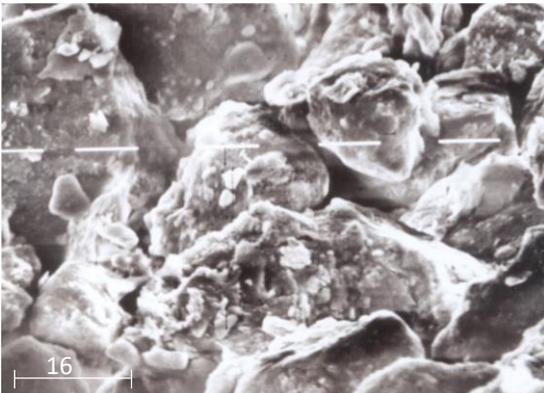
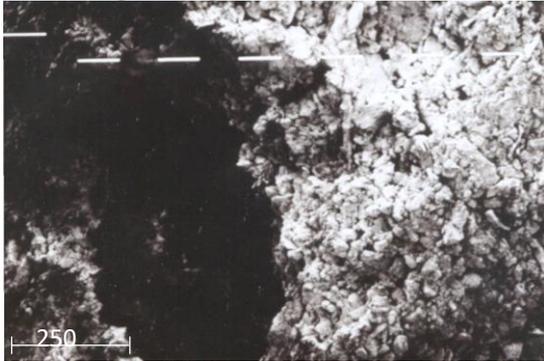
Table 3.- Range of exchangeable and soluble cations in loess.

Exchangeable Cations (me/100g)					Soluble Cations (me/100g)			
Ca	Mg	Na	K	CEC	Ca	Mg	Na	K
3 - 12	2 - 6	1 - 15	1 - 3	14 - 25	0.1 - 0.5	0.06 - 0.2	0.5 - 4	0.03 - 0.1

limits of primary and secondary loess.

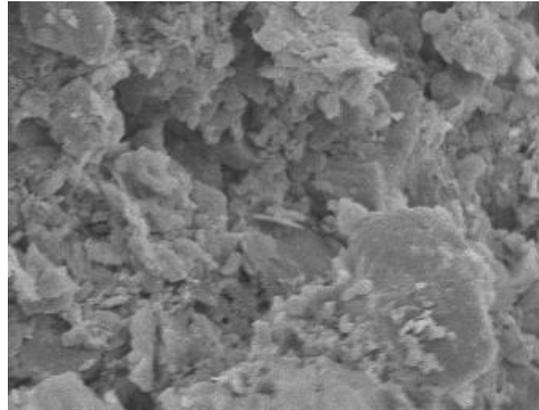


CARACTERIZACION

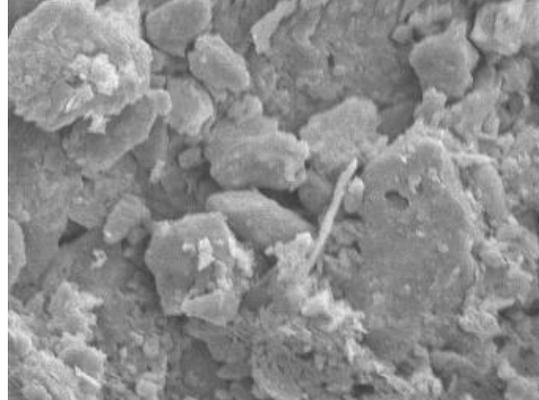




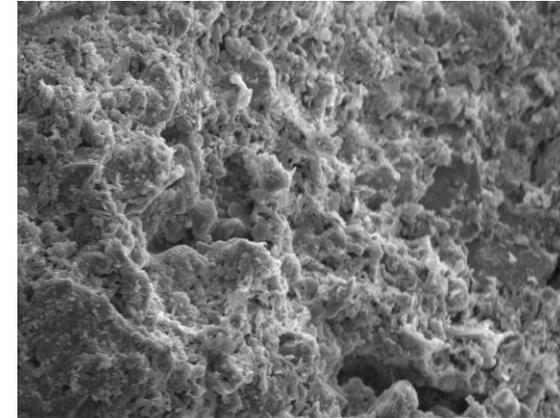
CARACTERIZACION LOESS CORDOBA



Mag HV Label Date Det
1500 x 20 kV 3MPC5 22/09/03 16:07 sem



Mag HV Label Date Det
1250 x 20 kV 3MPC5 22/09/03 16:07 sem



Mag HV Label Date Det
503 x 20 kV 3MPC1 22/09/03 16:07 sem

Ensayo de Desmoronamiento (similar ASTM D4644)

Before Starting



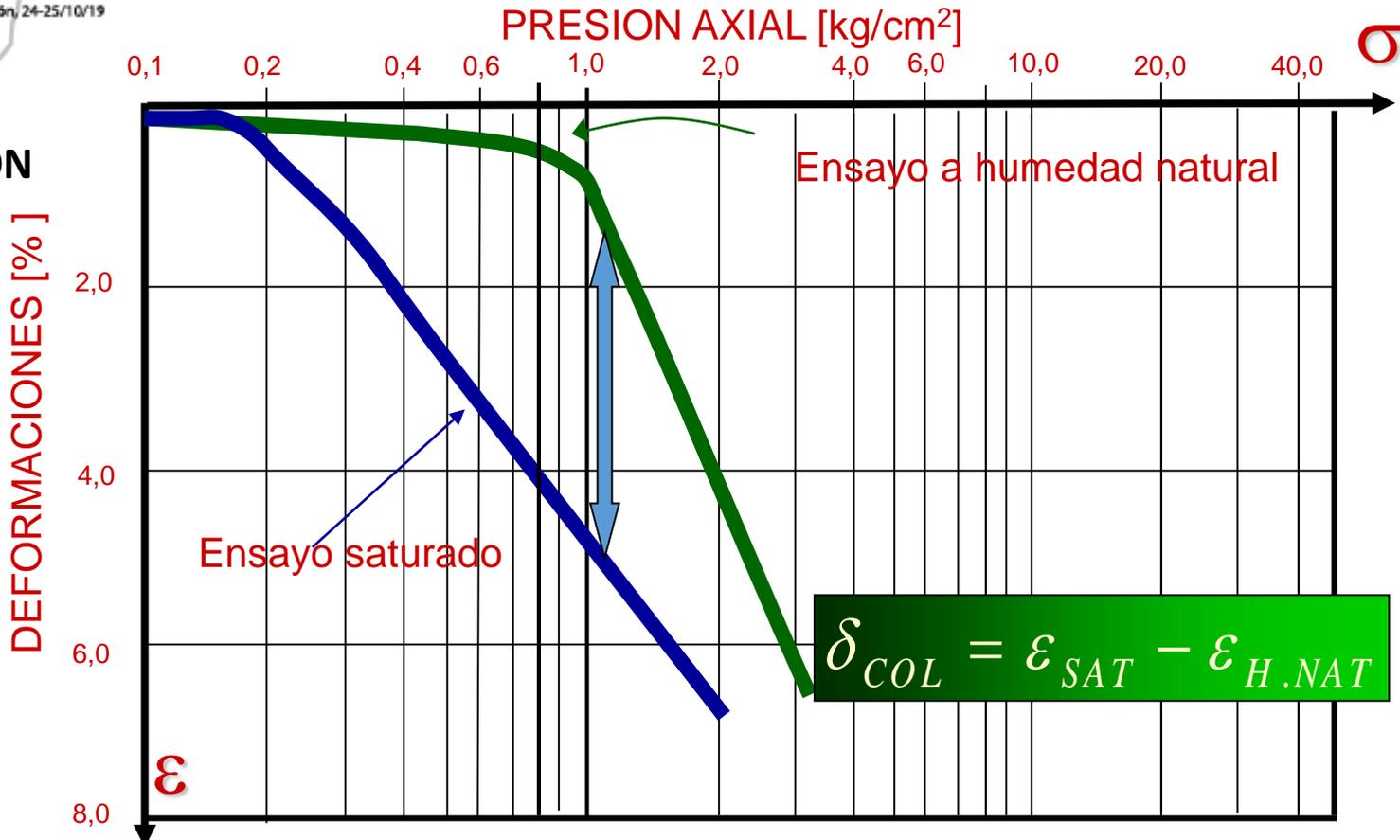
CARACTERIZACION



CARACTERIZACION

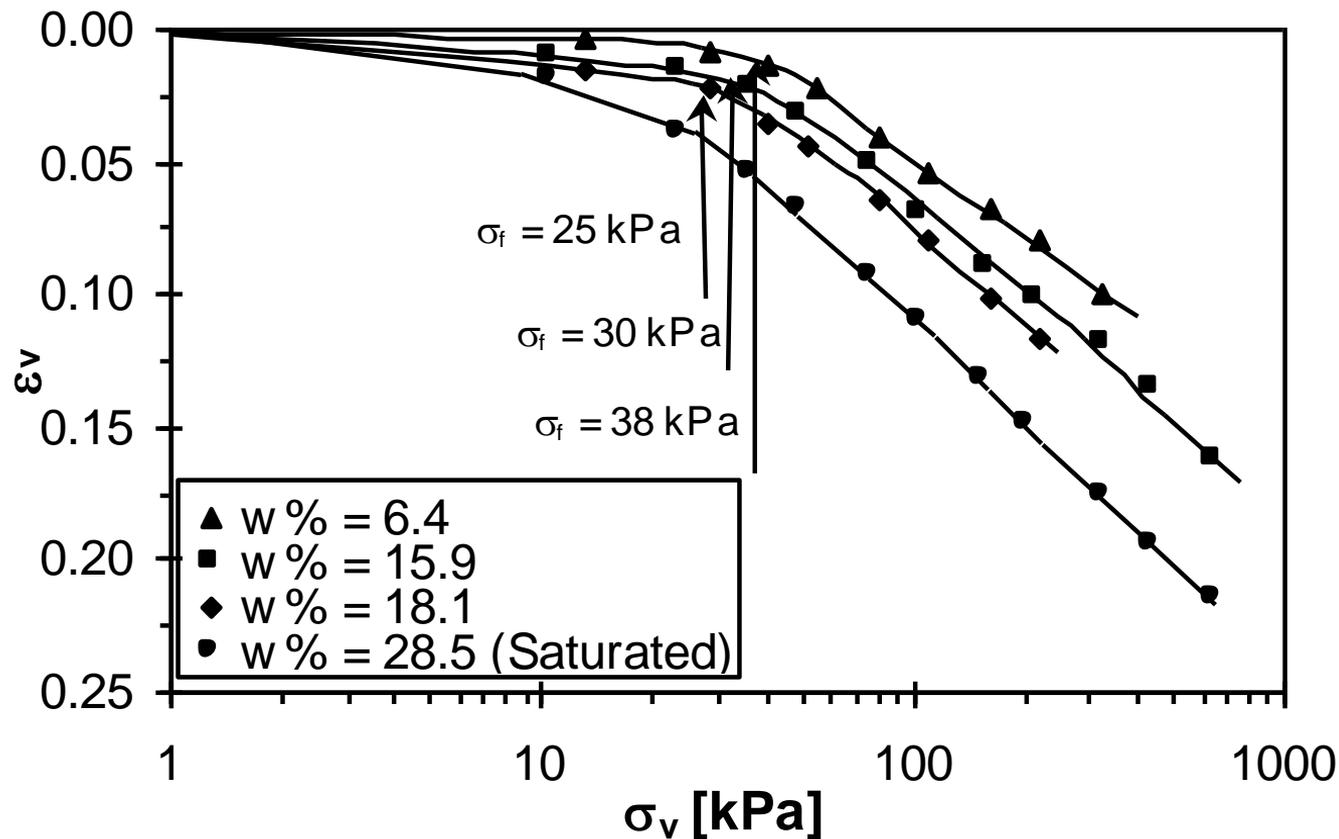
PROPIEDADES MECÁNICAS

Reginatto y Ferrero (1973)



CARACTERIZACION

PROPIEDADES
MECÁNICAS



CARACTERIZACION

PROPIEDADES MECÁNICAS

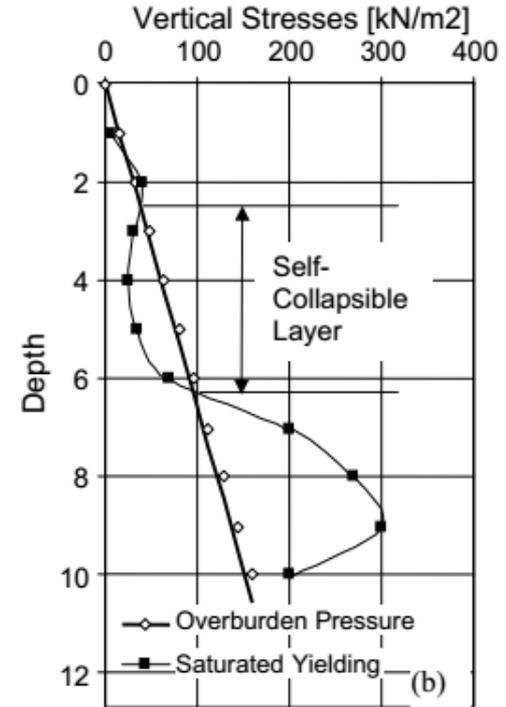
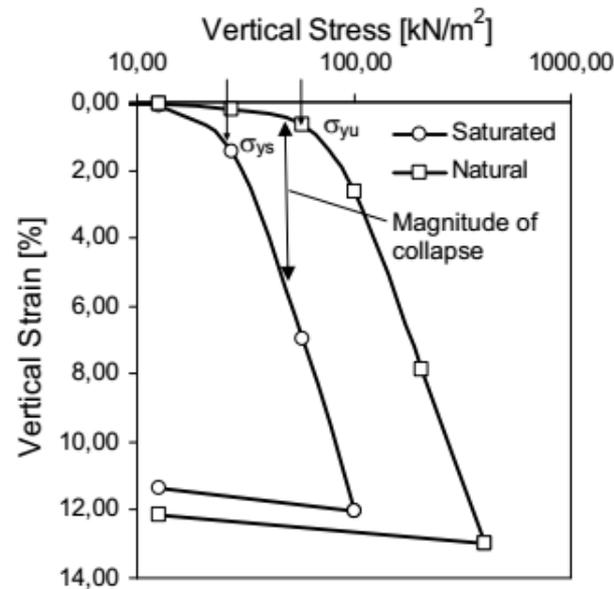
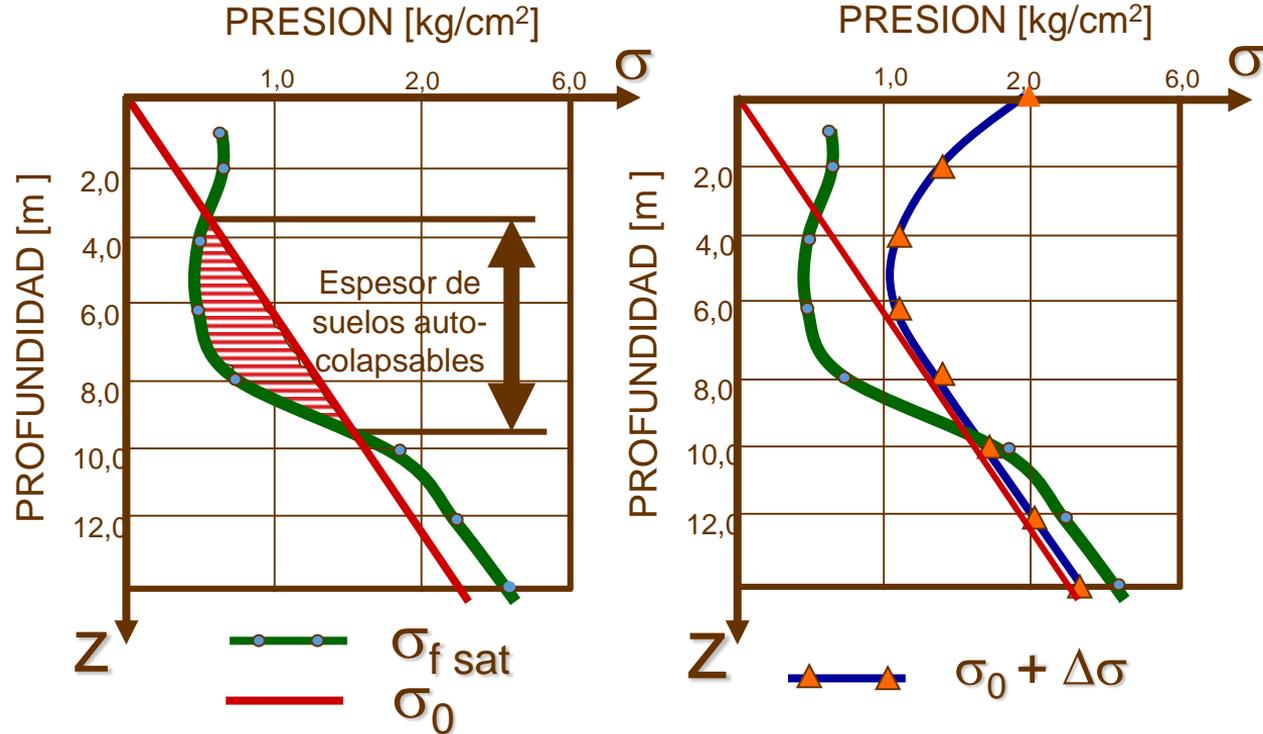


Figure 8.- a) Double oedometer test used to determine the magnitude of collapse in loess; b) Comparison of the overburden and saturated yielding pressures used to evaluate the thickness and subsidence of a self-collapsible layer of loess.

Perfiles de colapsabilidad

CARACTERIZACION

PROPIEDADES MECÁNICAS



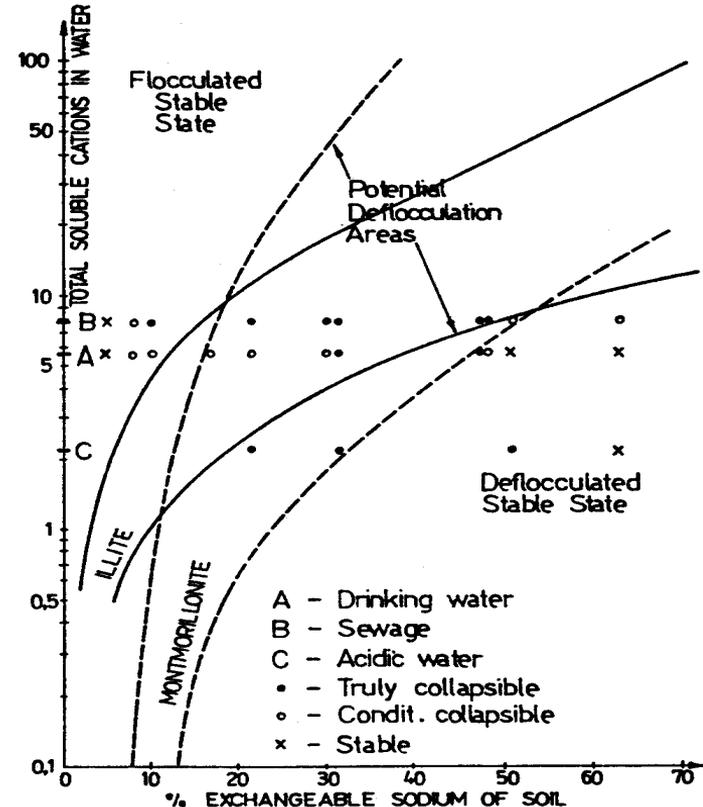
CARACTERIZACION

Flocculation Dispersion Test

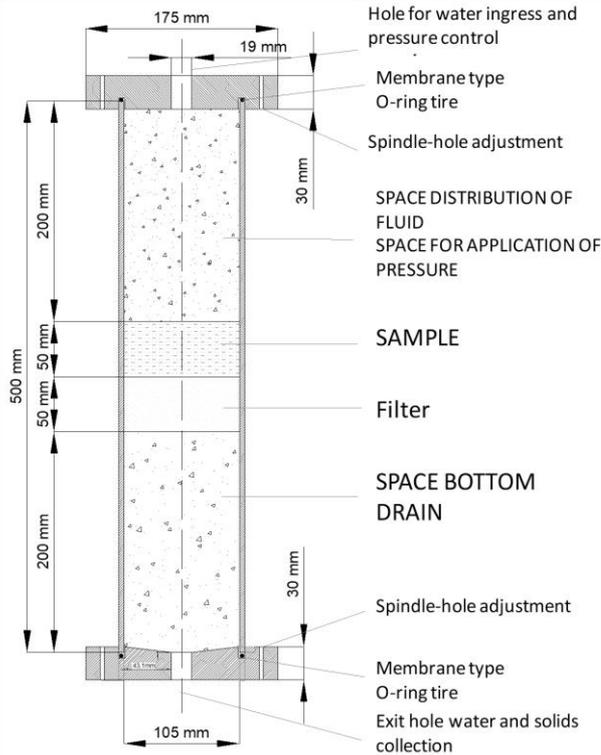
$$TDS(me/l) = Ca^{++} + Mg^{++} + Na^{+} + K^{+}$$

$$ESP = \frac{Na^{+}}{Ca^{++} + Mg^{++}}$$

Reginatto and Ferrero (1973)



CONTROL DE COMPORTAMIENTO





CONTROL DE COMPORTAMIENTO



CONTROL DE COMPORTAMIENTO



CONTROL DE COMPORTAMIENTO

Acciones generales (Moll et al. 1988):

a. Mejoramiento del suelo

- Por reducción de porosidad (eg. Compactación hidráulica, compactación dinámica, densificación por inclusion de pilotes, etc.).
- Por rigidización del esqueleto sólido (eg. Adición de silicatos, jet grouting, etc.)

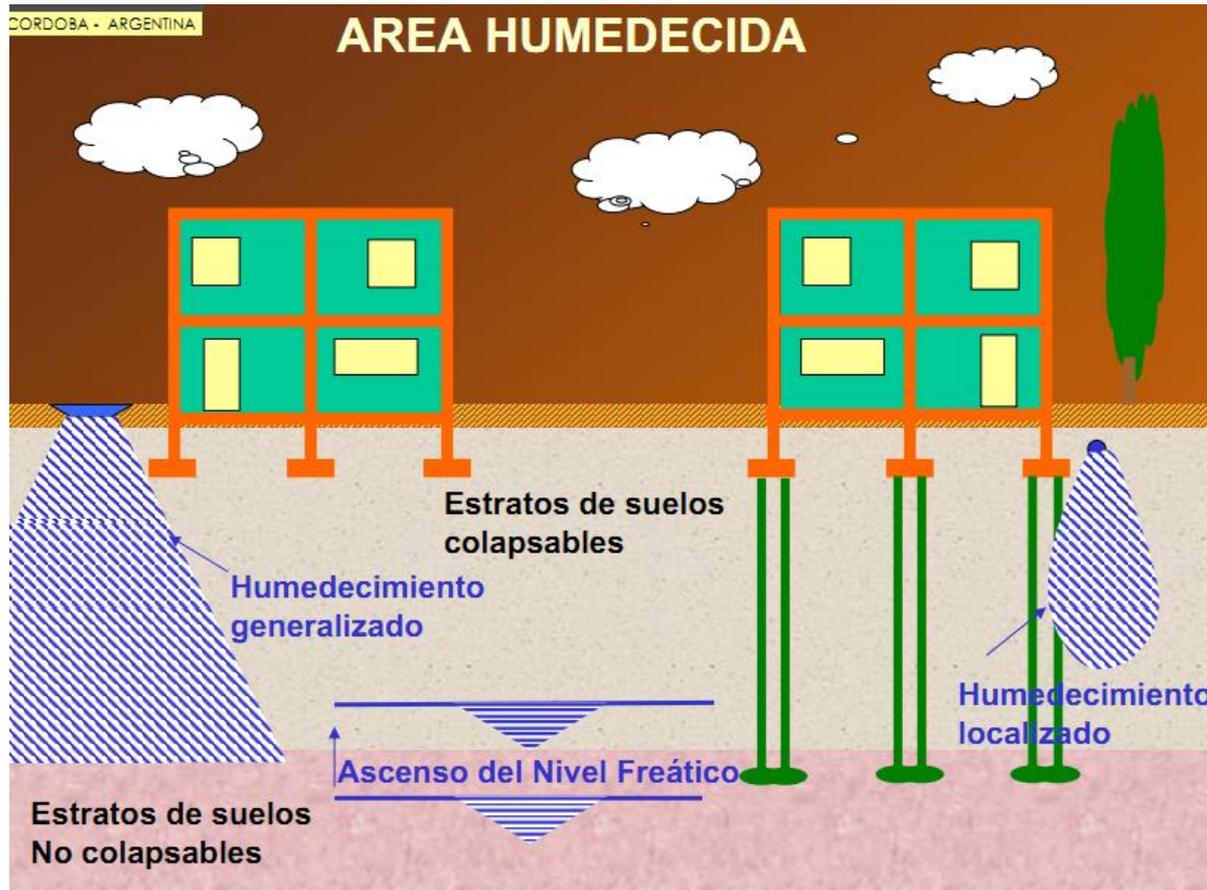
b. Minimización de la colapsabilidad del suelos, con control del humedecimiento del suelo:

- Colocación de una cobertura impermeable,
- Construction of aceras impermeables en el perímetro de construcciones, y un Sistema de drenaje.

c. Alternativas de construcción que reduzcan el impacto del colapso en las estructuras

- (eg. Muros o estructuras aisladas, etc.).

CONTROL DE COMPORTAMIENTO



1. DEFINICIÓN DE LA SUFUSION DE SUELOS

2. PARAMETROS Y ENSAYOS DE IDENTIFICACION

3. SUELOS LOESSICOS

4. CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

El proceso de SUFUSION, es un fenómeno conocido hace más de medio siglo. Es un fenómeno que hace referencia a una inestabilidad estructural a través de acciones físico – mecánicas.

En su caracterización, el problema es interpretado mayormente como un fenómeno de control de filtración o autoerosión, por lo tanto la composición granulométrica es una de las forma más comunes de identificación.

En la medición de la potencial del efecto nocivo de la erodabilidad, se pueden realizar ensayos de erosión, similares al Pin Hole, con control de material erosionado.

Las principales acciones de mejoramiento se relacionan con: Modificación de la Estructura del Suelo, Impermeabilización, Control de Filtros, Aislación de los Efectos del Agua.



“Inestabilidad Interna en
Suelos Limo Arcillosos.
Fenómenos de Sufusión”



**GRACIAS POR SU
ATENCIÓN**