

COMPACTACIÓN

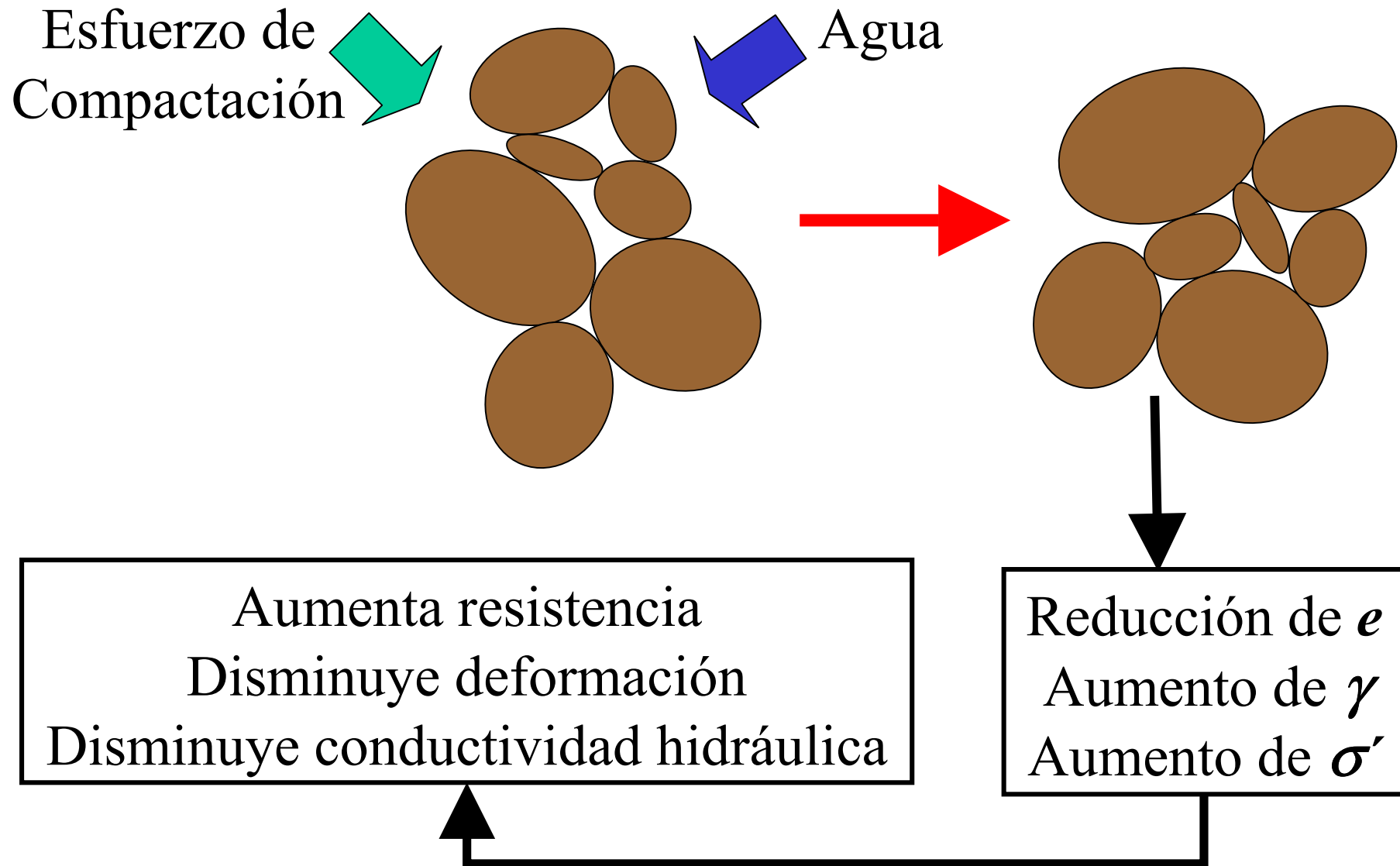
Curso de Actualización Profesional
2019

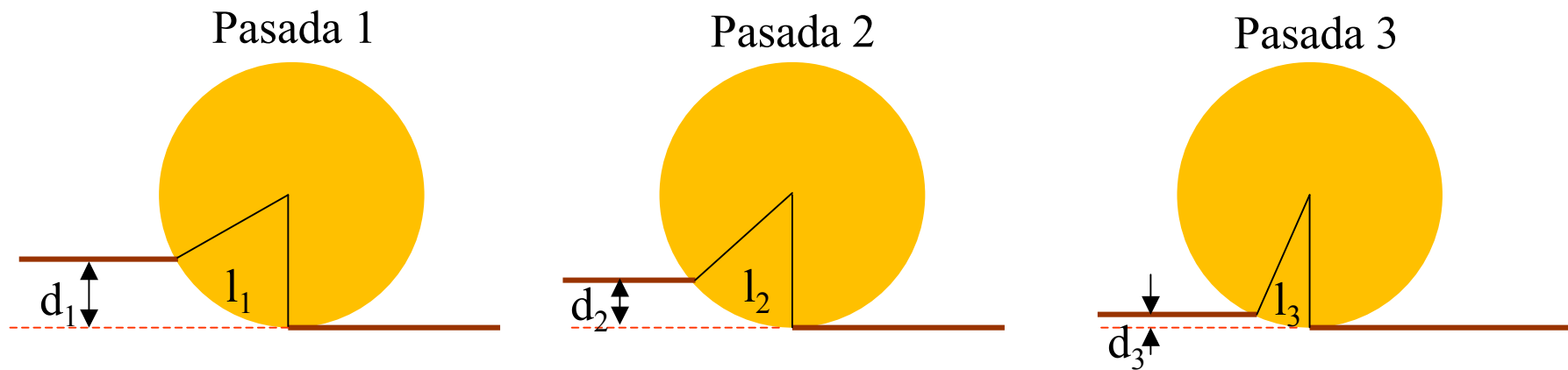
COMPACTACIÓN

Método mecánico de
mejoramiento de las
propiedades del suelo



Reducción de volumen de
suelo por reducción de
volumen de aire
mediante aplicación de
energía mecánica





$l_3 < l_2 < l_1$: Longitud del área de contacto

$(d_2 - d_3) < (d_1 - d_2)$: Reducción de espesor en sucesivas pasadas

Pasada 1 - Pasada 2

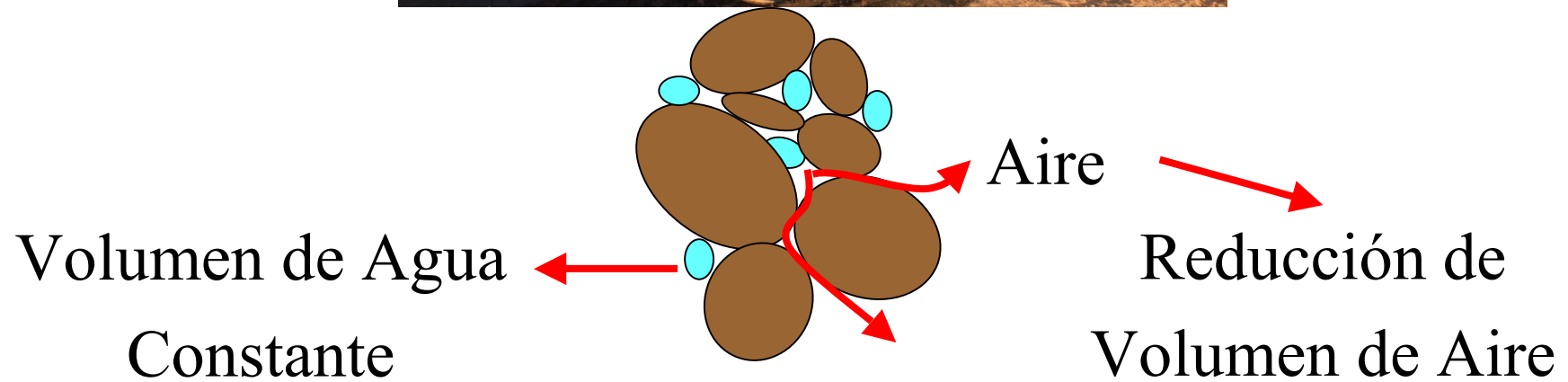
Disminuye asentamiento y área de contacto rodillo-suelo
Aumenta tensión rasante y PUS

Pasada 2 - Pasada 3

Aumenta tensión rasante
Disminuye asentamiento hasta hacerse despreciable

Condición casi saturada

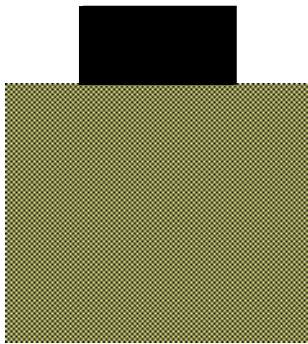
Transferencia de tensiones al agua (exceso de presiones de poro)



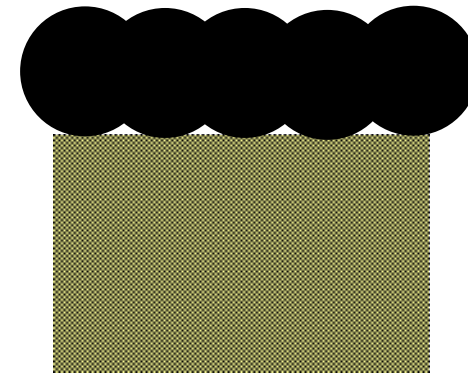
Compactación: Suelos no Saturados

Métodos de Compactación

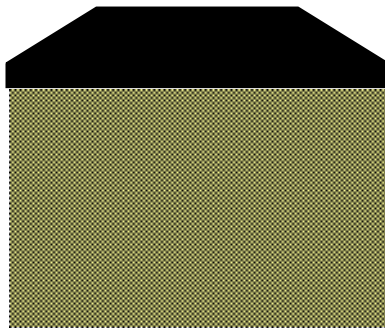
Dinámico



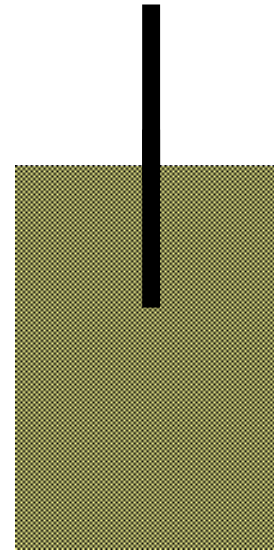
Amasado



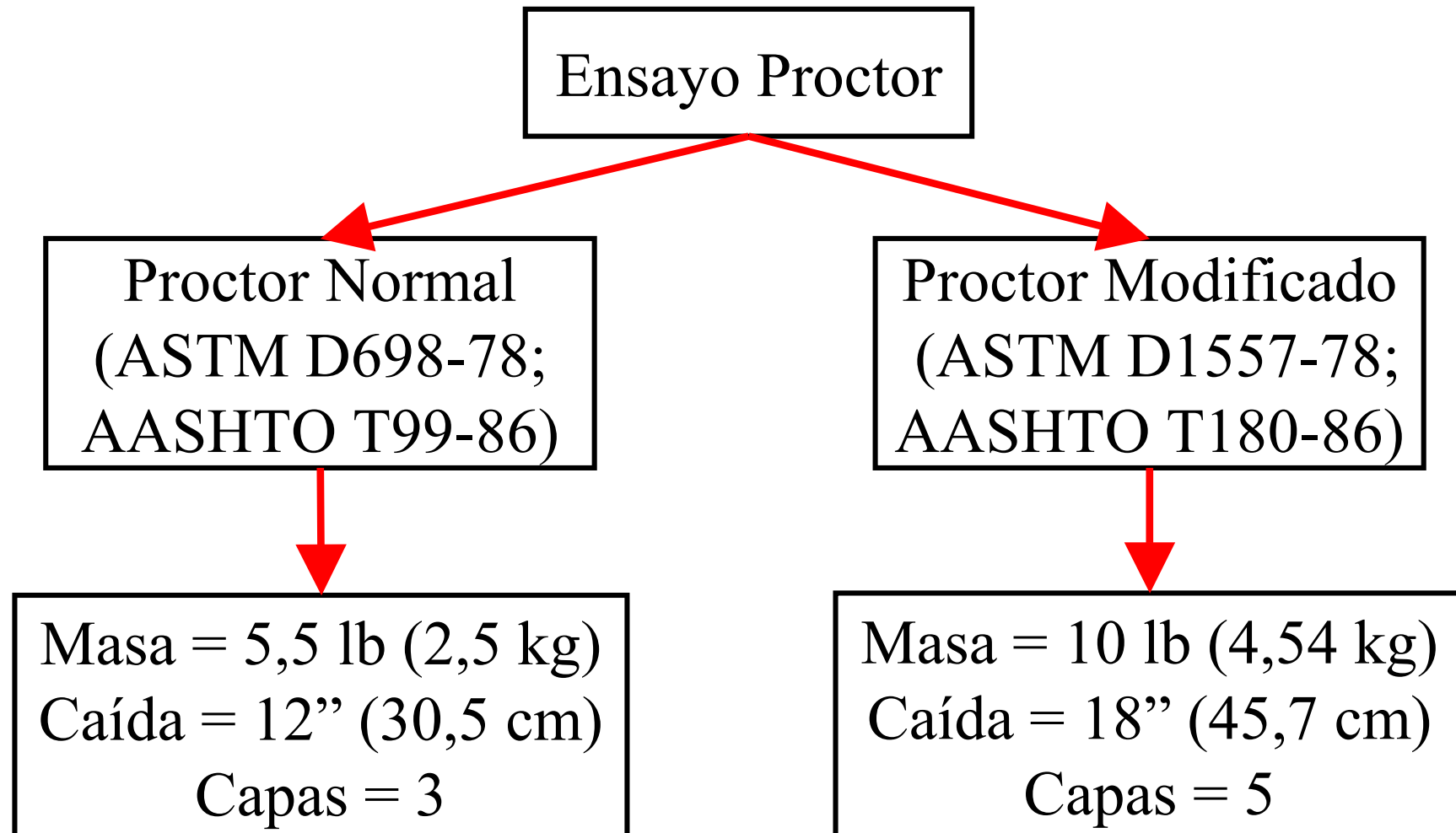
Precarga



Vibrado



Compactación Dinámica



Ensayo de Compactación Proctor



Diámetro 4" (101,6mm):
Suelo de tamaño máximo 4,75mm (#4)
25 golpes/capa

Diámetro 6" (152,4mm):
Suelo de tamaño máximo 3/4"
56 golpes/capa

Compactación por Amasado

Mini-Harvard



Suelos que pasan #4

Amasado con compactador metálico cuyo extremo tiene 1/2" de diámetro, con mango ranurado que encierra muelle precomprimido calibrado (20 lb o 40 lb)

Compactación Estática



Compactación en capas con carga estática

Dividir muestra en porciones iguales

Compactación por Vibrado

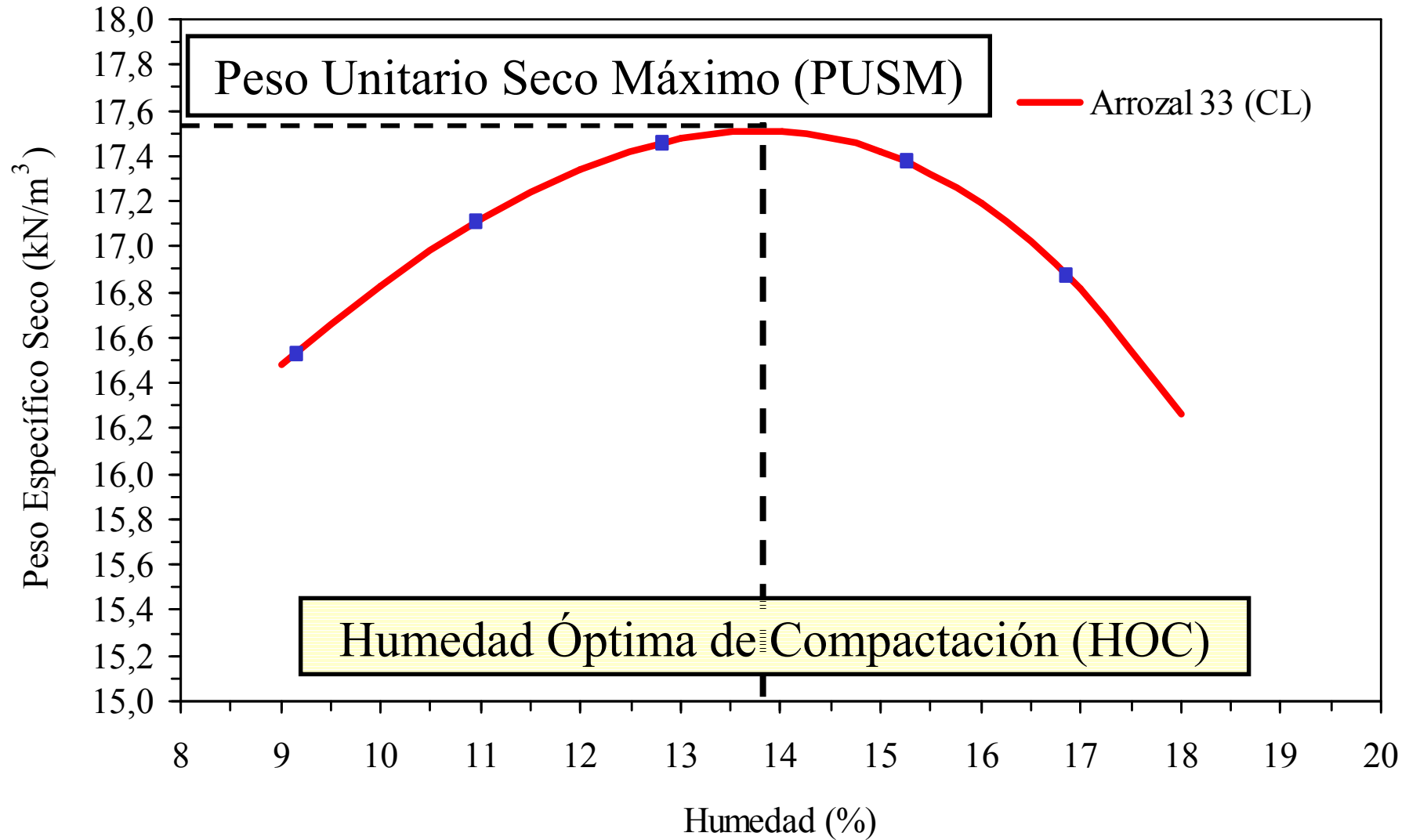
Densidad Relativa de Arena $D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$

- e_{\min} : Vertido por caída libre mediante embudo (“lluvia de arena”)
- e_{\max} : Vertido por caída libre mediante embudo (“lluvia de arena”) y adensamiento por golpes laterales mediante martillo de goma o neumático
- Requieren criterios de D_r máximo o mínimo (según el caso)

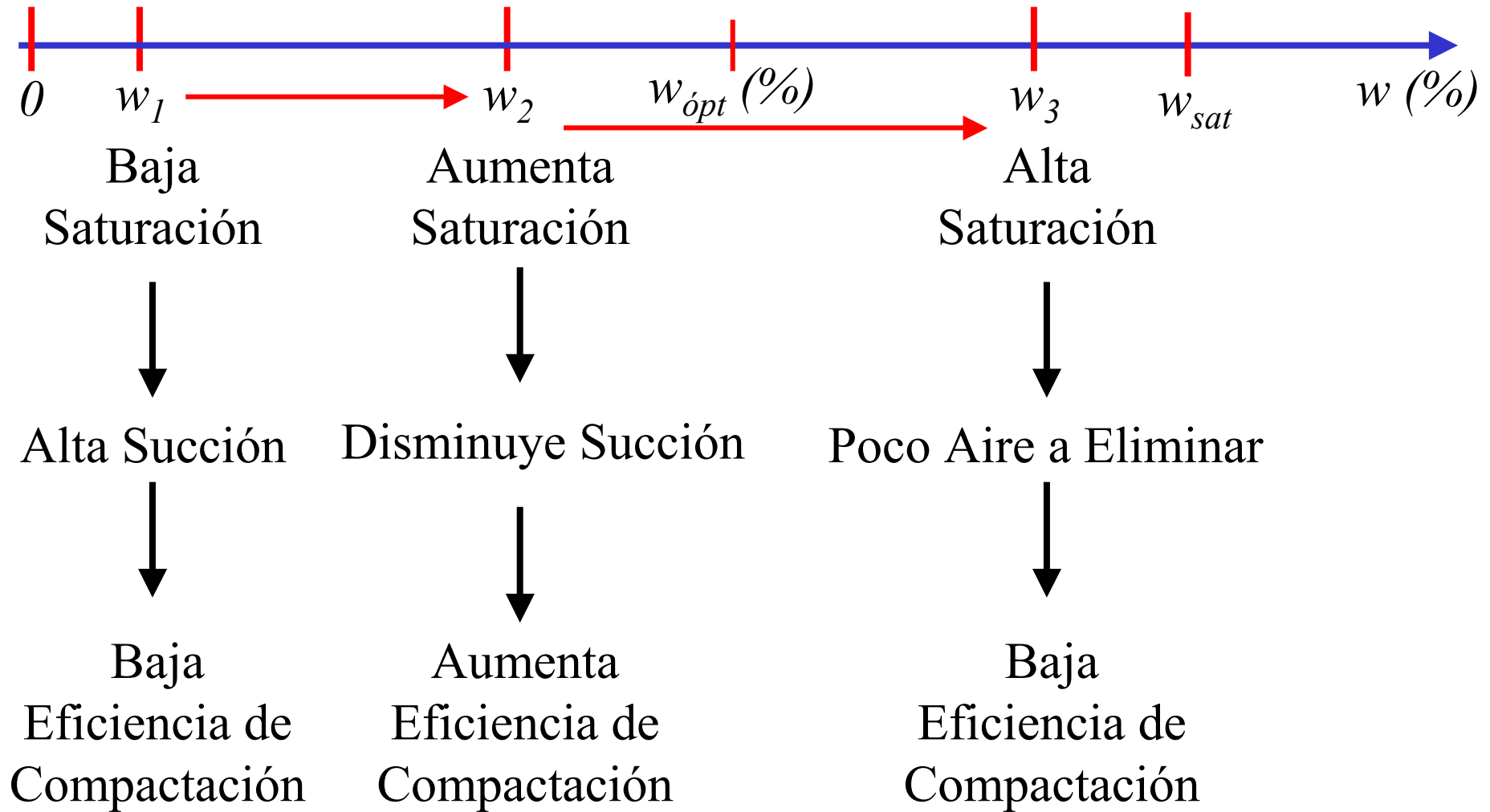
FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COMPACTACIÓN (Proctor, 1933)

- Humedad de Compactación
- Energía de Compactación
 - Tipo de Suelo
- Volumen Compactado

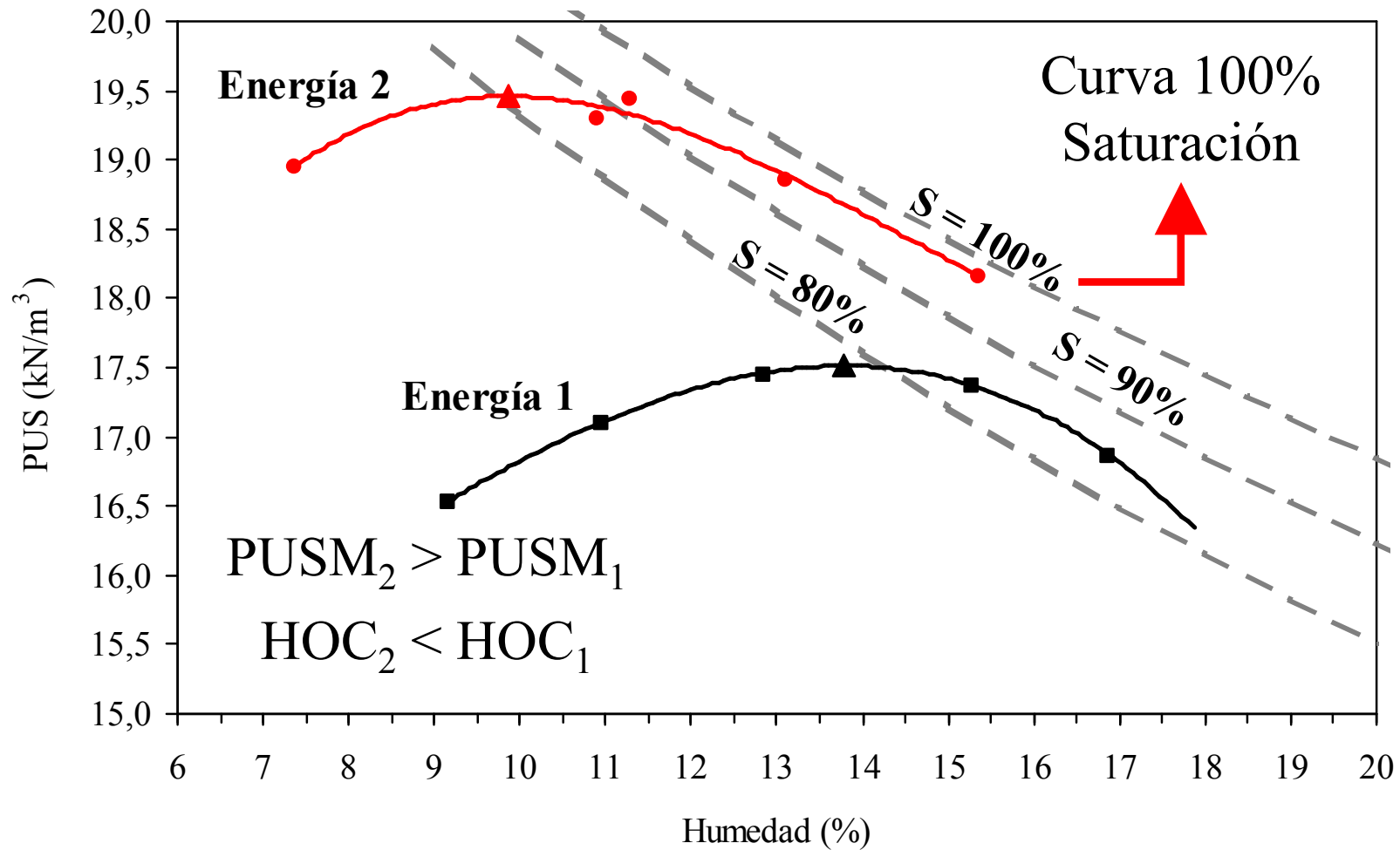
Humedad de Compactación



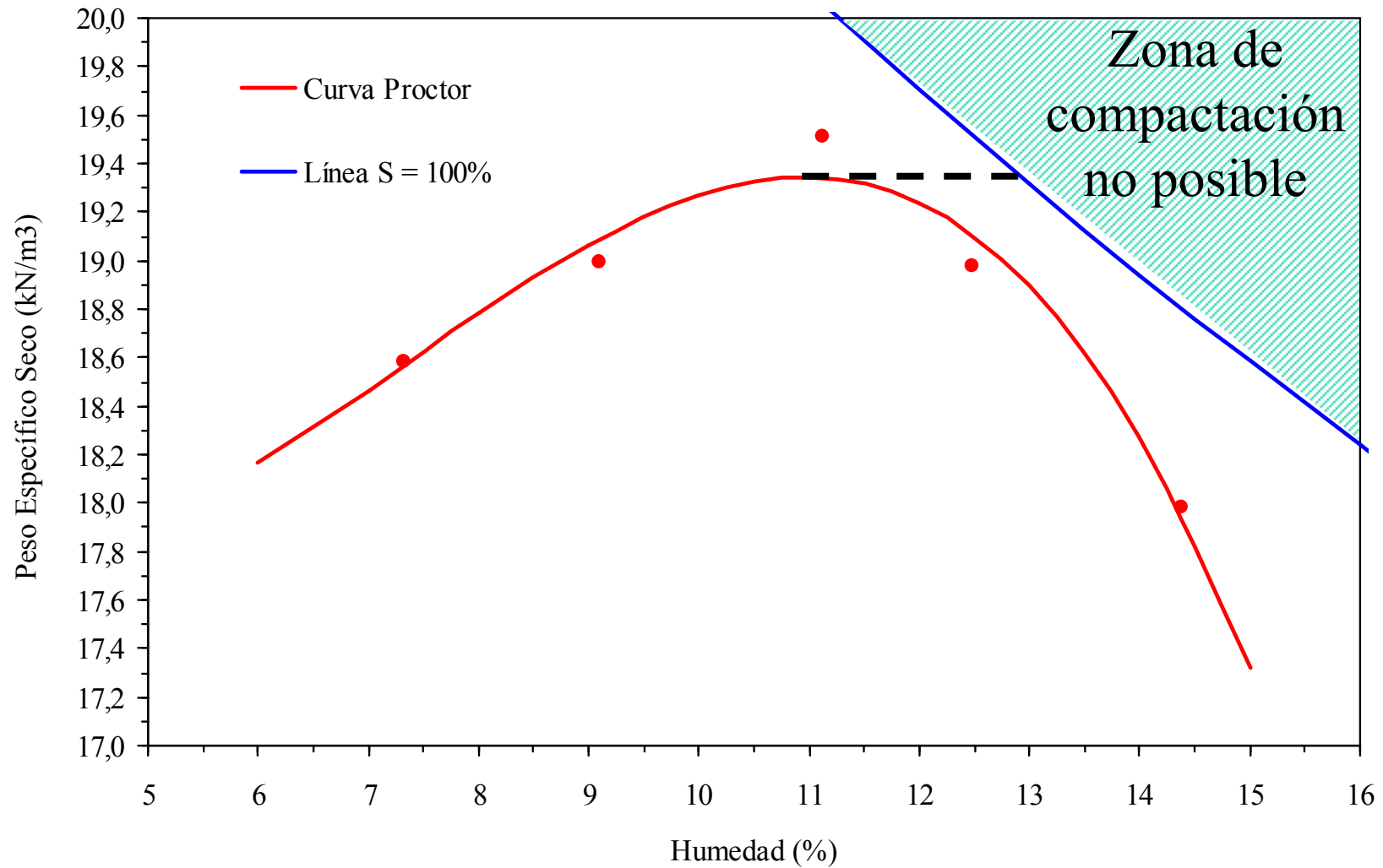
Causas del Comportamiento PUS - w



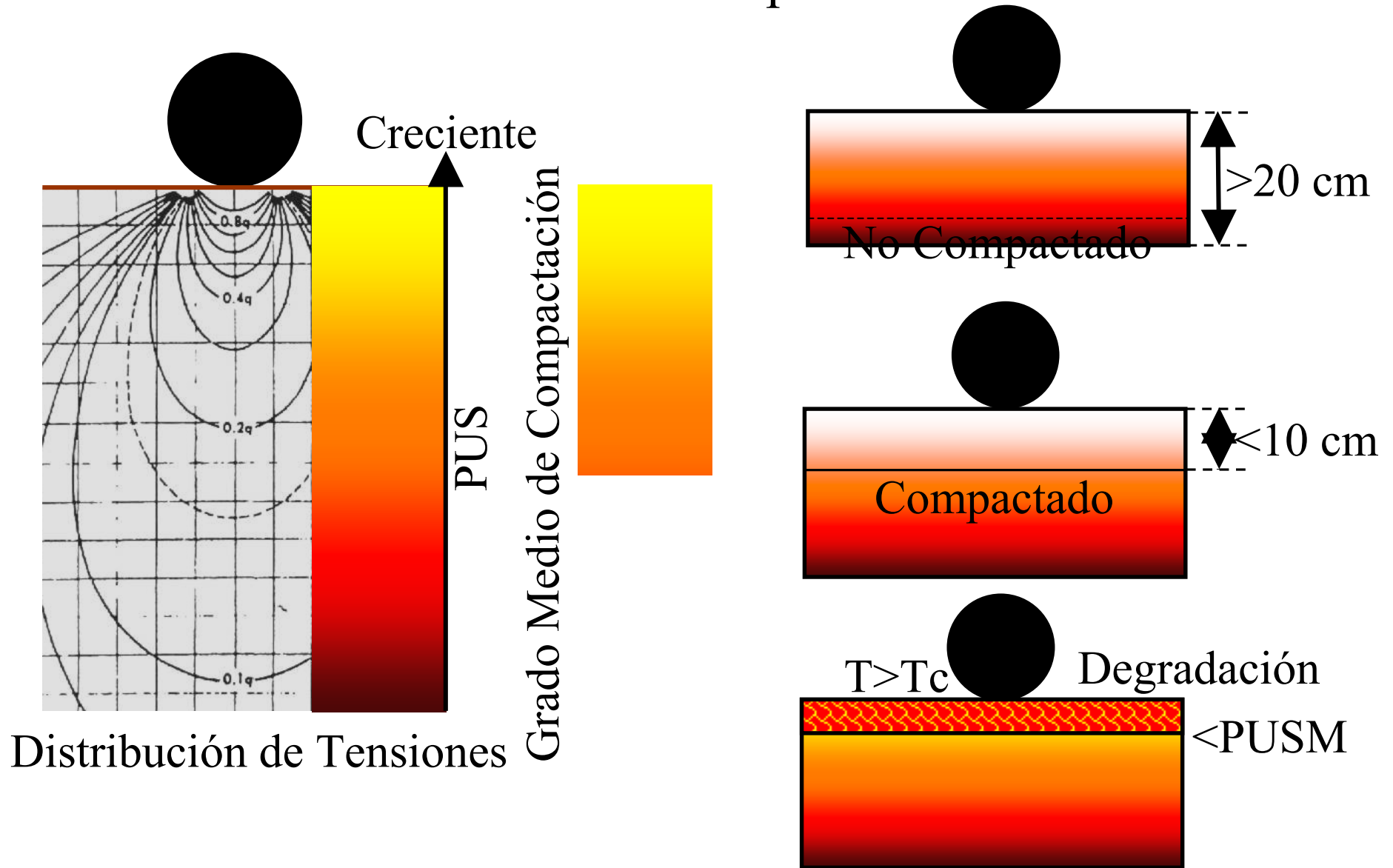
Energía Específica



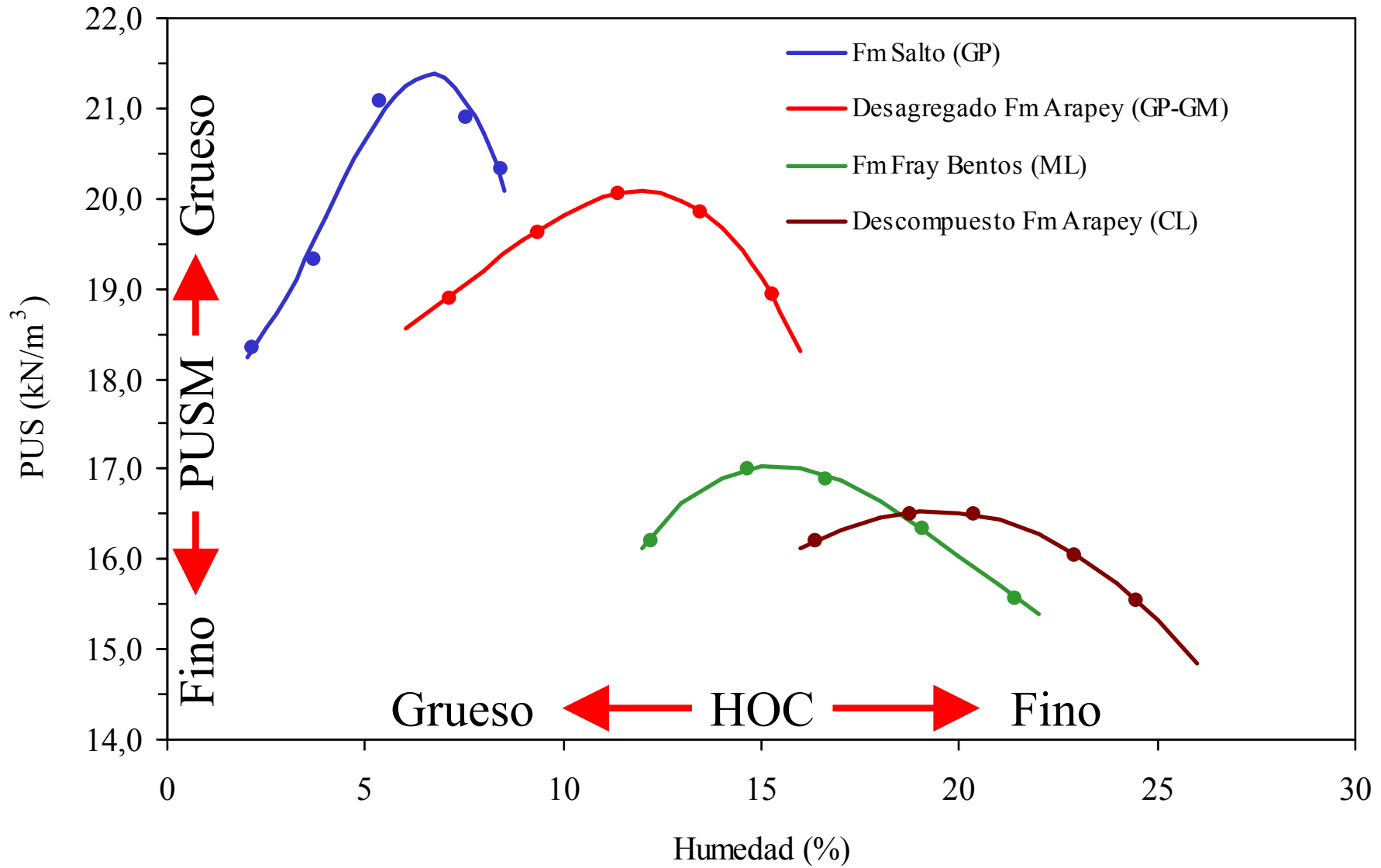
Energía Específica



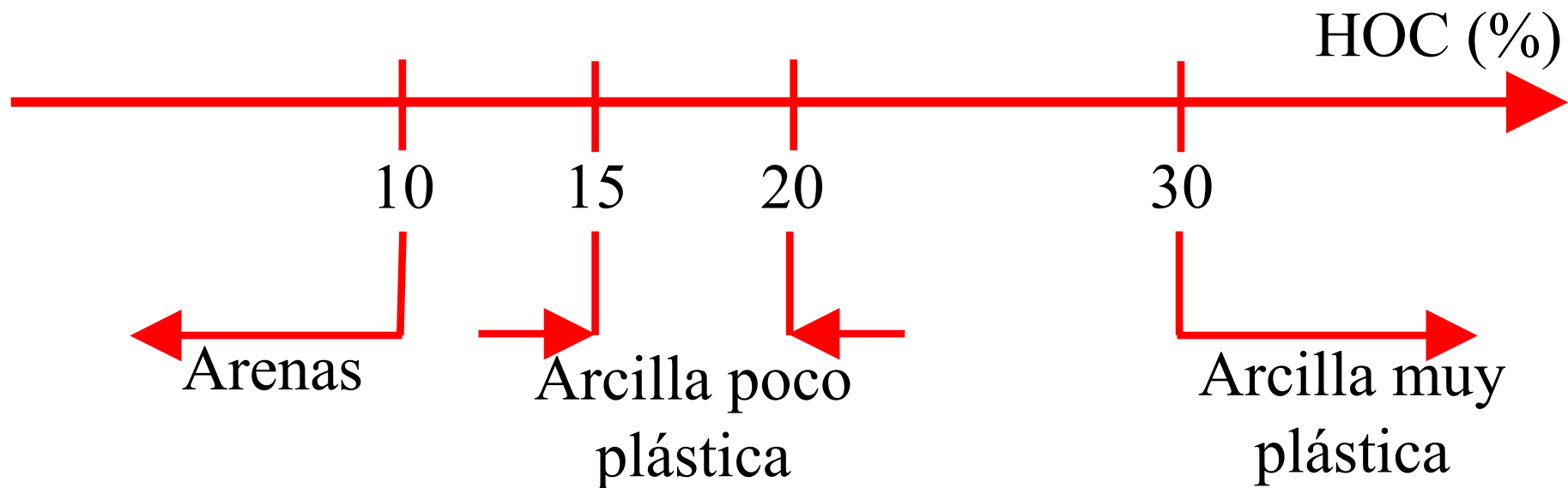
Volumen Compactado



Tipo de Suelo



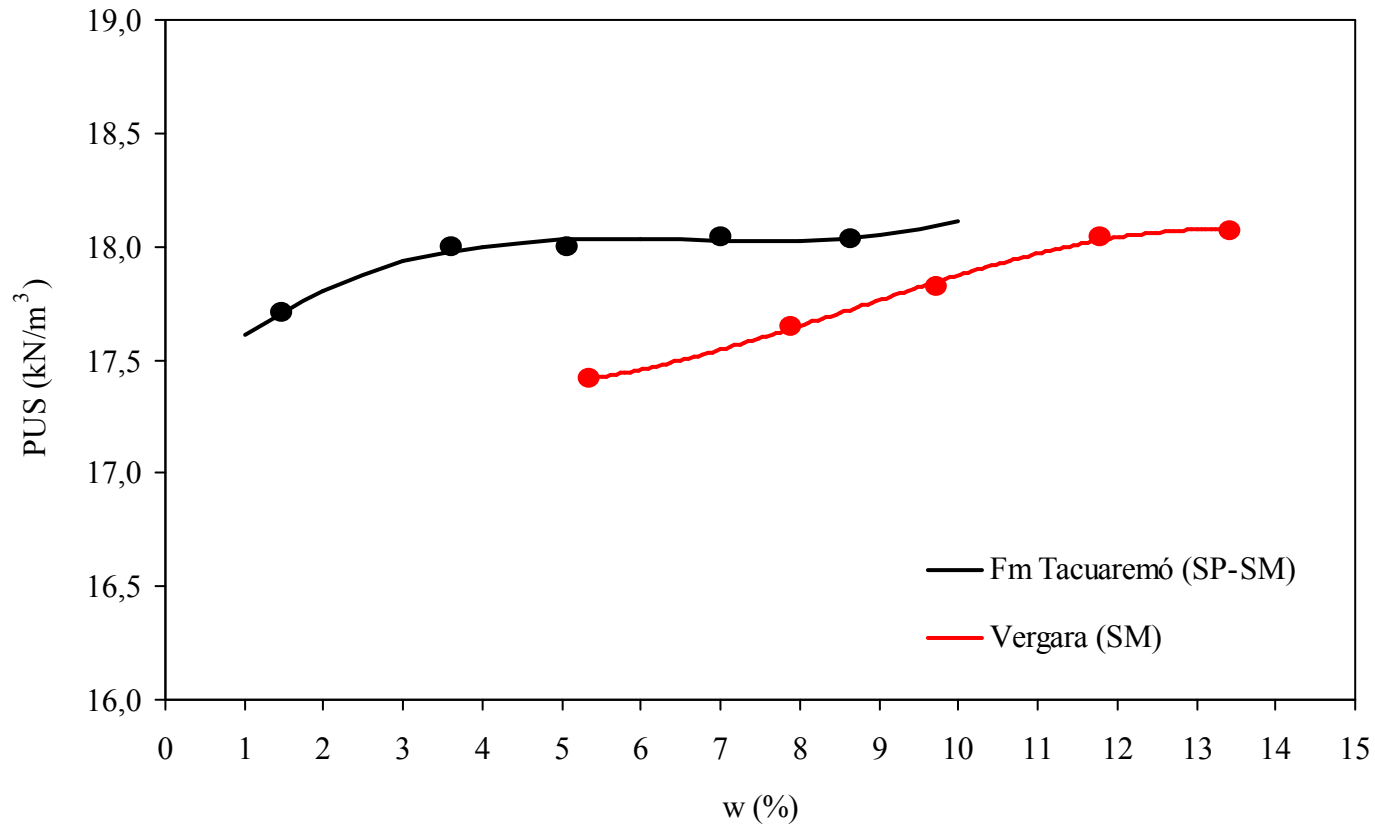
Tipo de Suelo



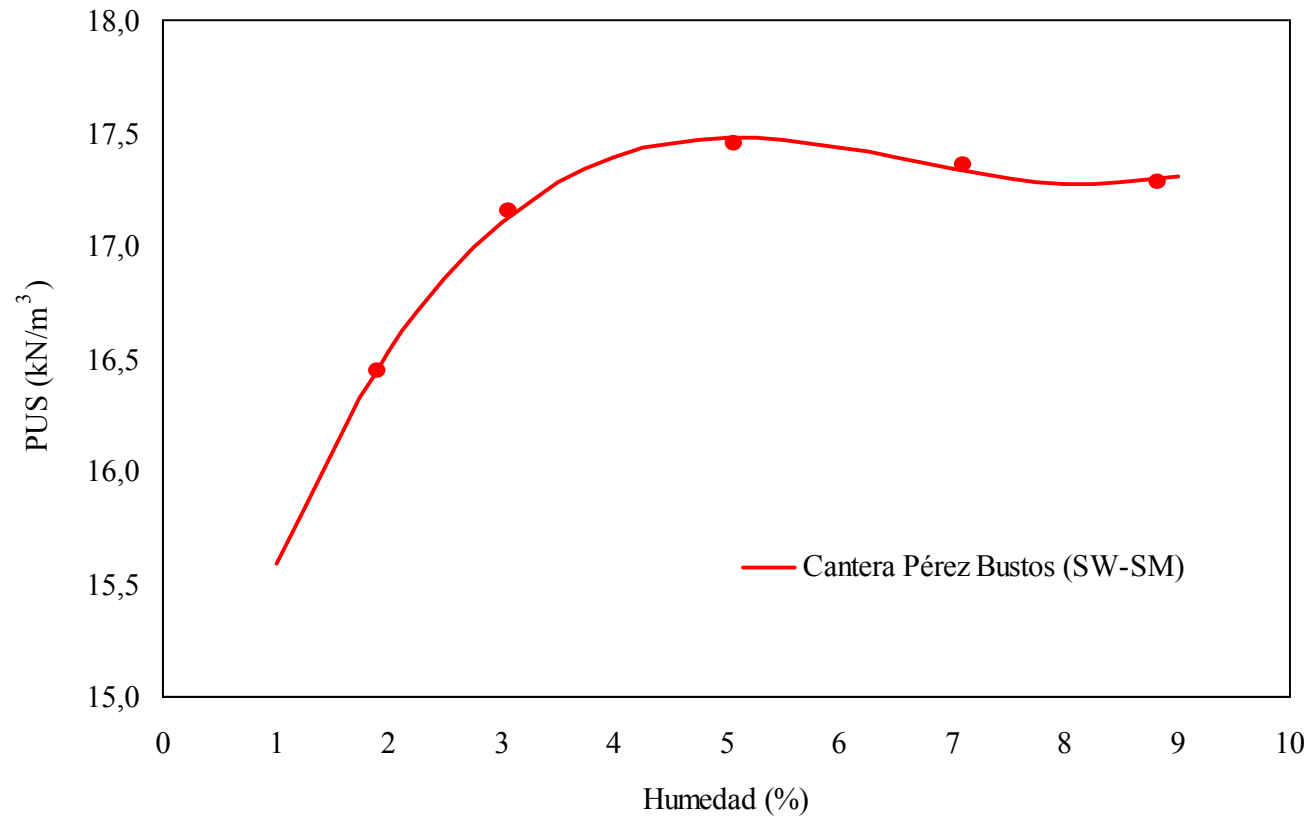
Suelos Bien Graduados

Forma de agregados y plasticidad de finos determina el
PUS

Curvas de Compactación Sin Forma Arenas

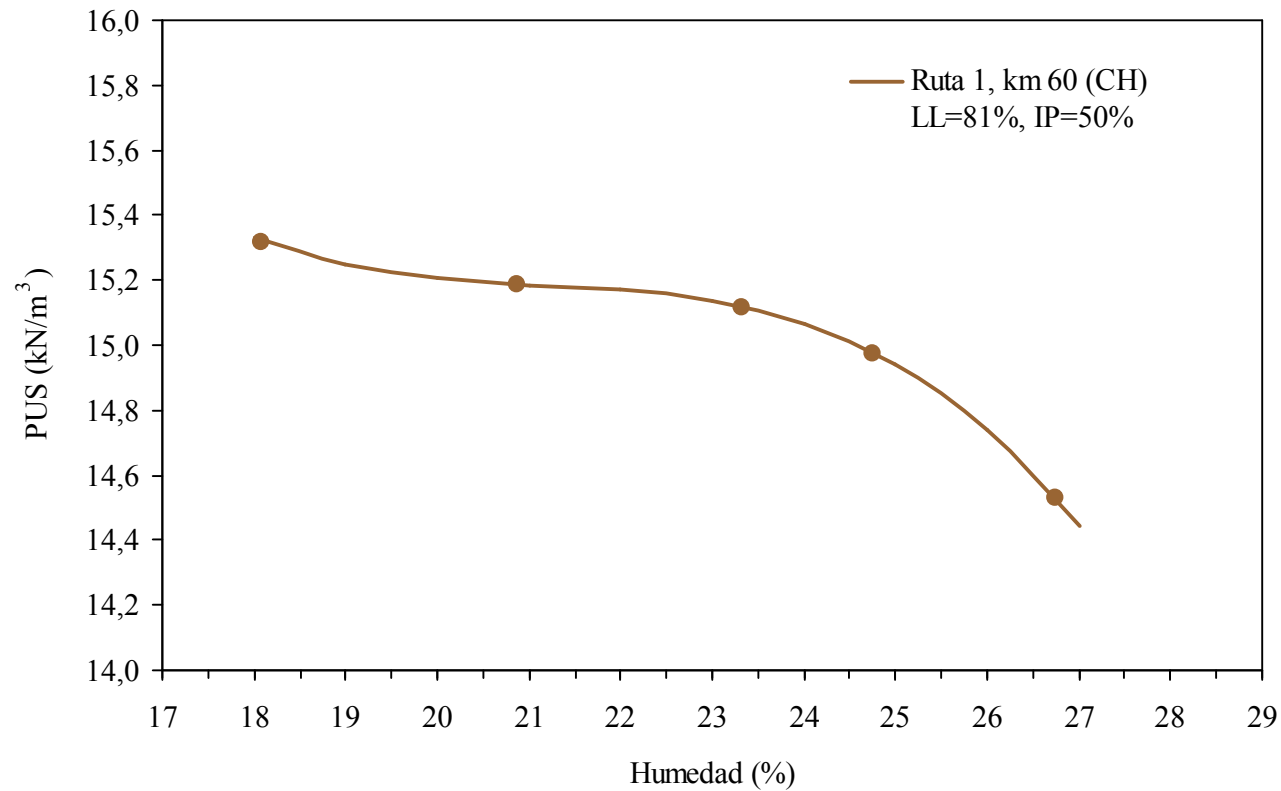


Curvas de Compactación Sin Forma Arenas

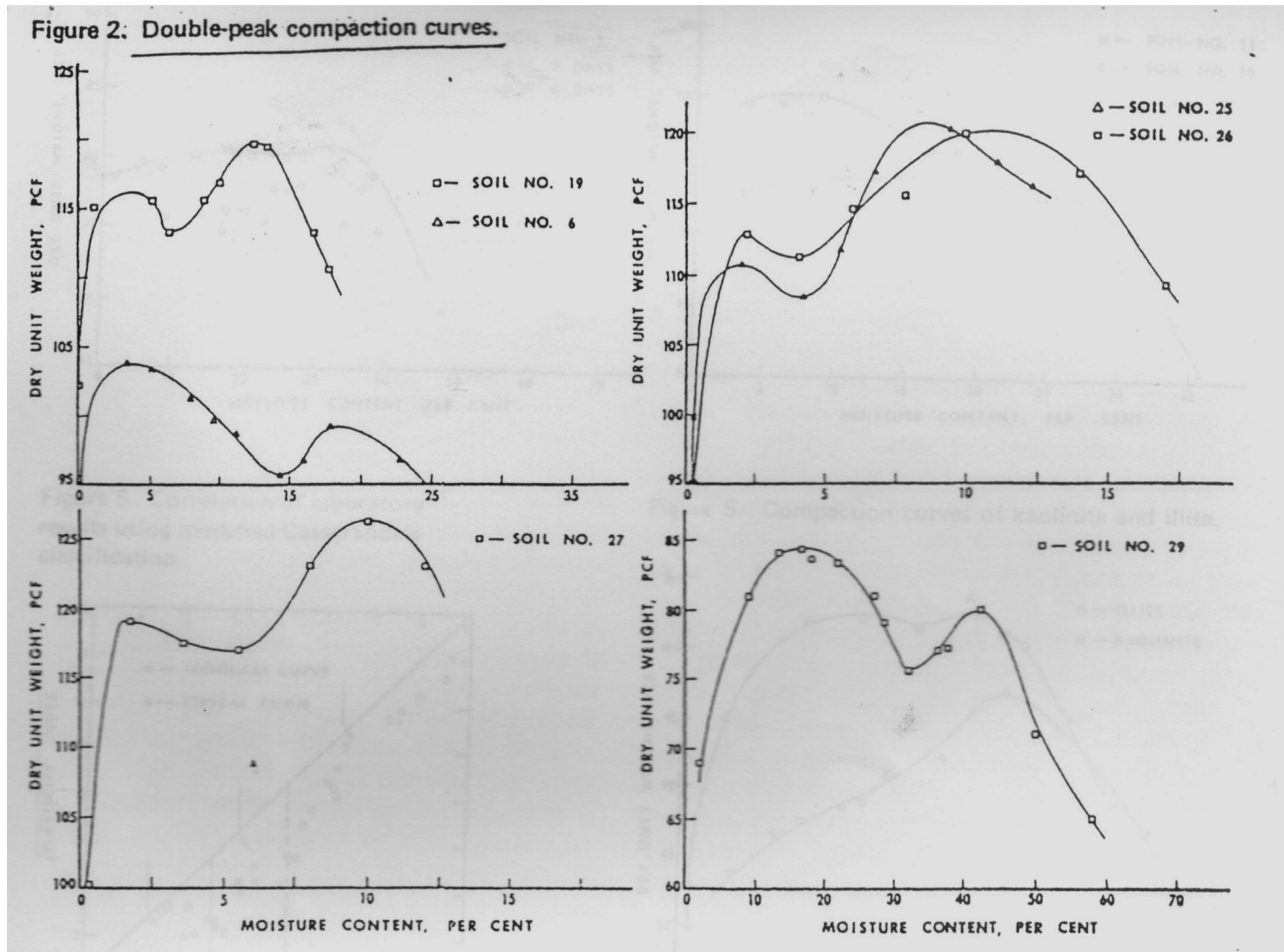


Curvas de Compactación Sin Forma

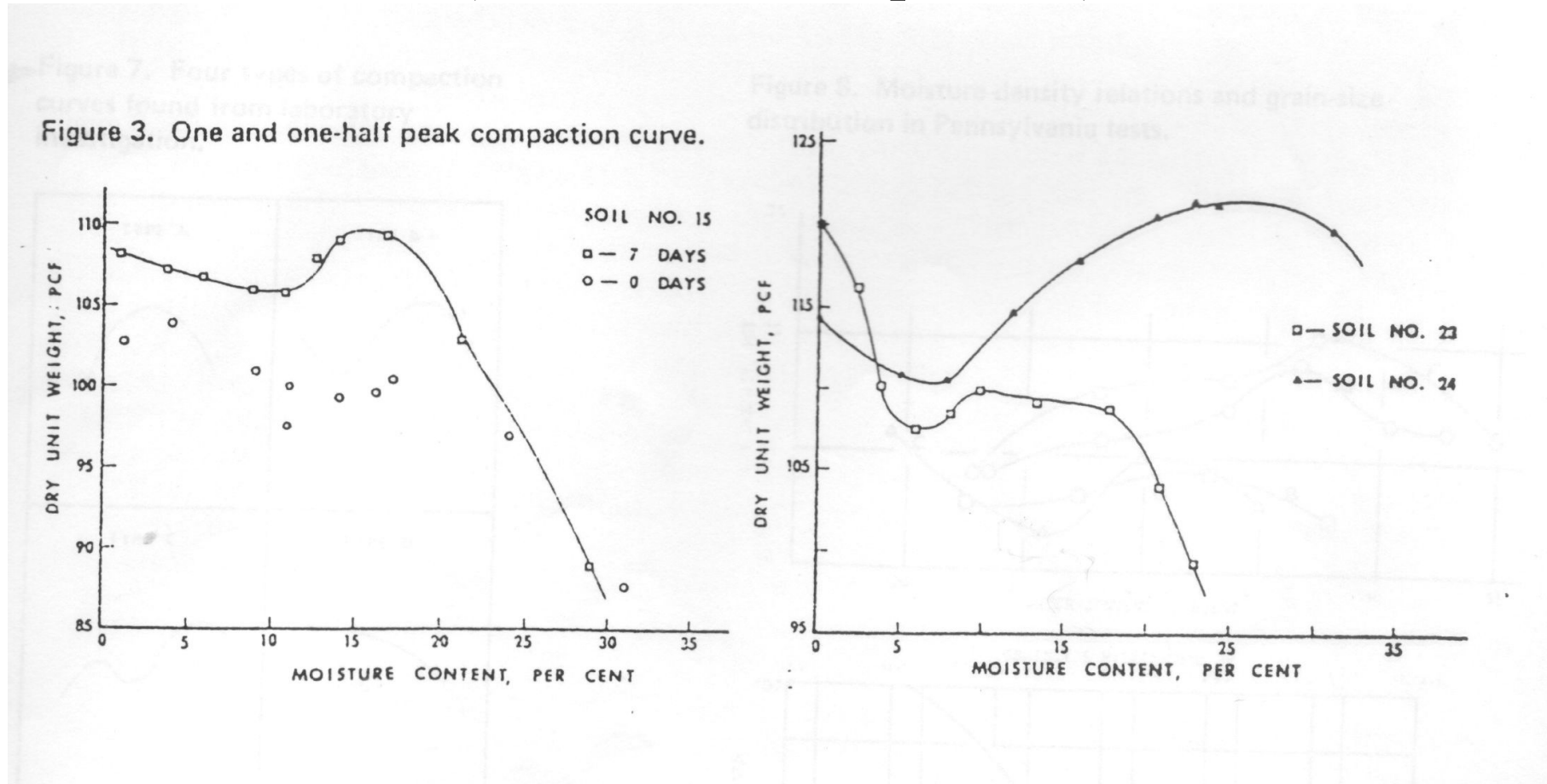
Arcilla Altamente Plástica



Curvas de Compactación con Doble Pico (Lee & Seudkamp, 1972)



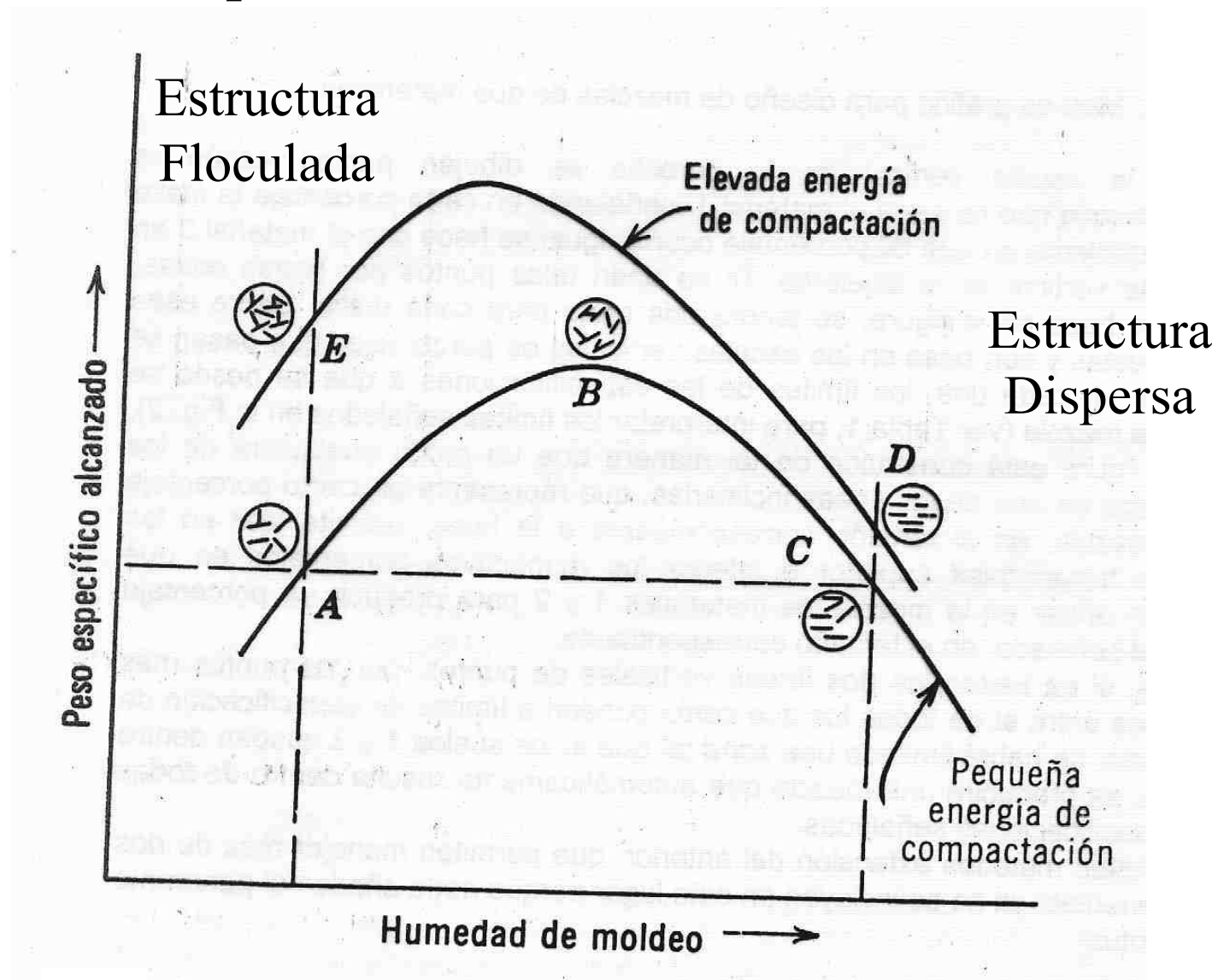
Curvas de Compactación con 1½ Pico (Lee & Seudkamp, 1972)



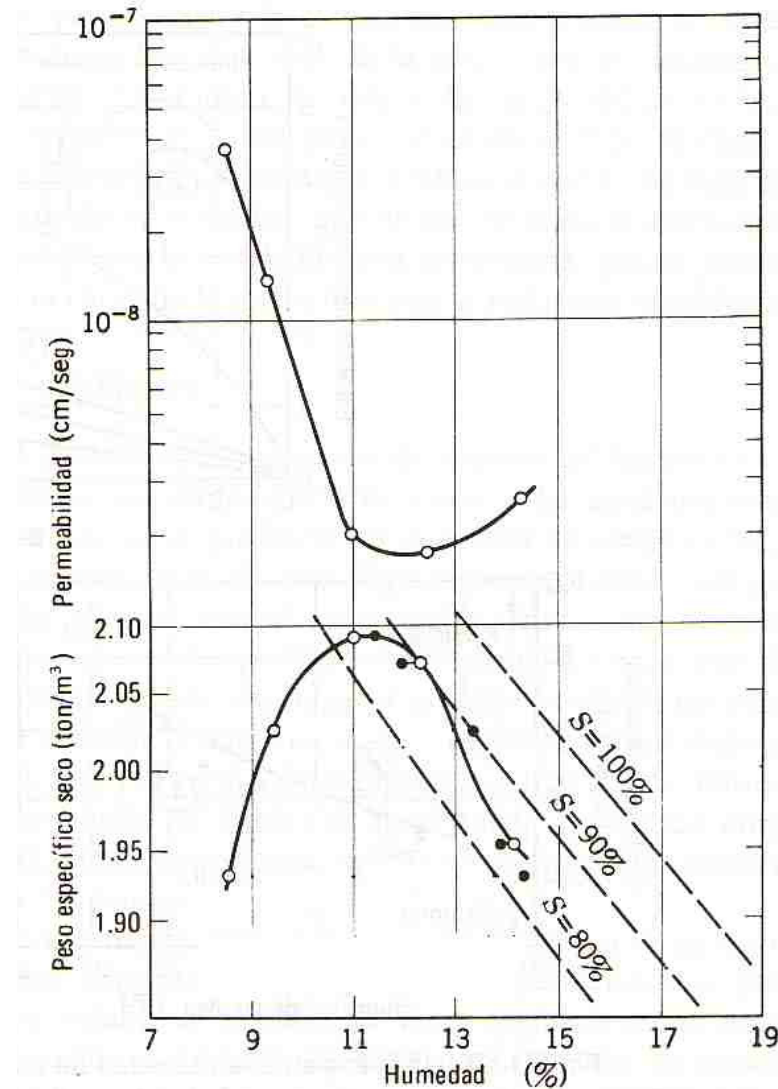
Tipos de Curvas de Compactación (Lee & Seudkamp, 1972)

- Suelos con $30\% < LL < 70\%$:
 - Curvas con 1 pico
- Suelos con $LL > 70\%$ (illitas, montmorillonitas):
 - Curvas con 2 picos
 - Curvas sin forma
- Suelos con $LL < 30\%$ (caolinitas)
 - Curvas con 2 picos
 - Curvas con $1\frac{1}{2}$ pico
- Arenas y Gravas mal graduadas:
 - Curvas sin forma

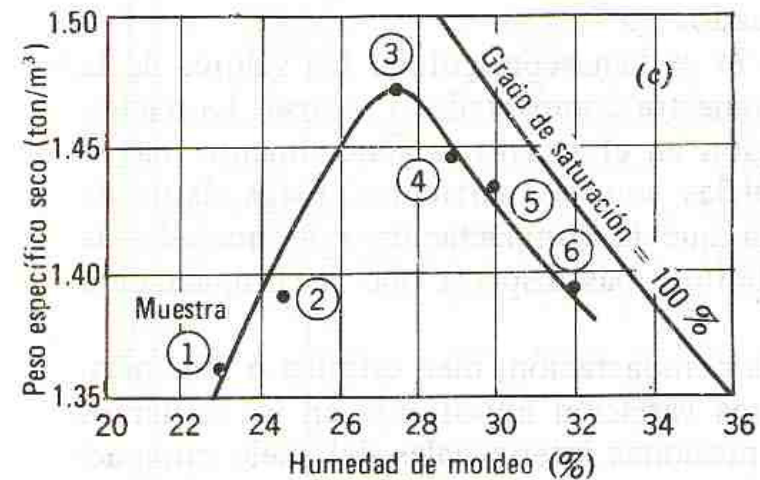
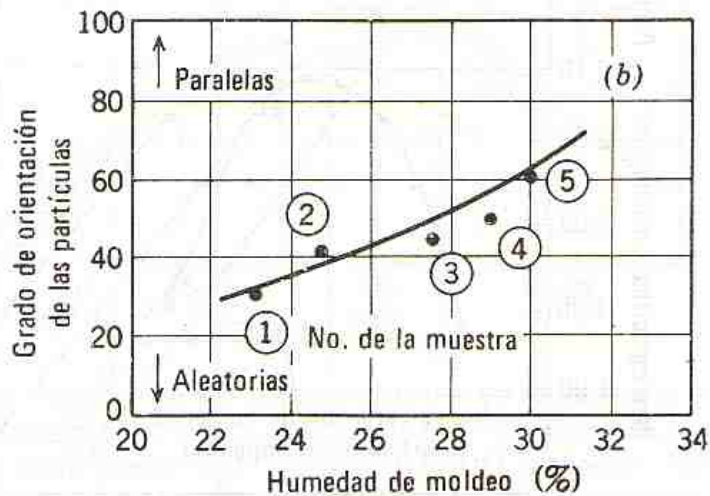
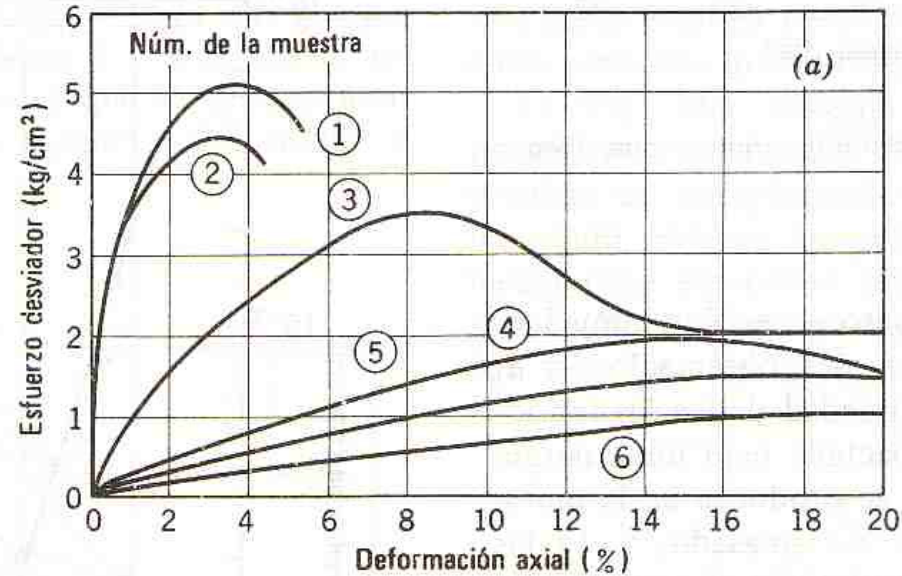
Efecto de Compactación en la Estructura de Suelos Finos



Efecto de Estructura de Suelos Finos Conductividad Hidráulica



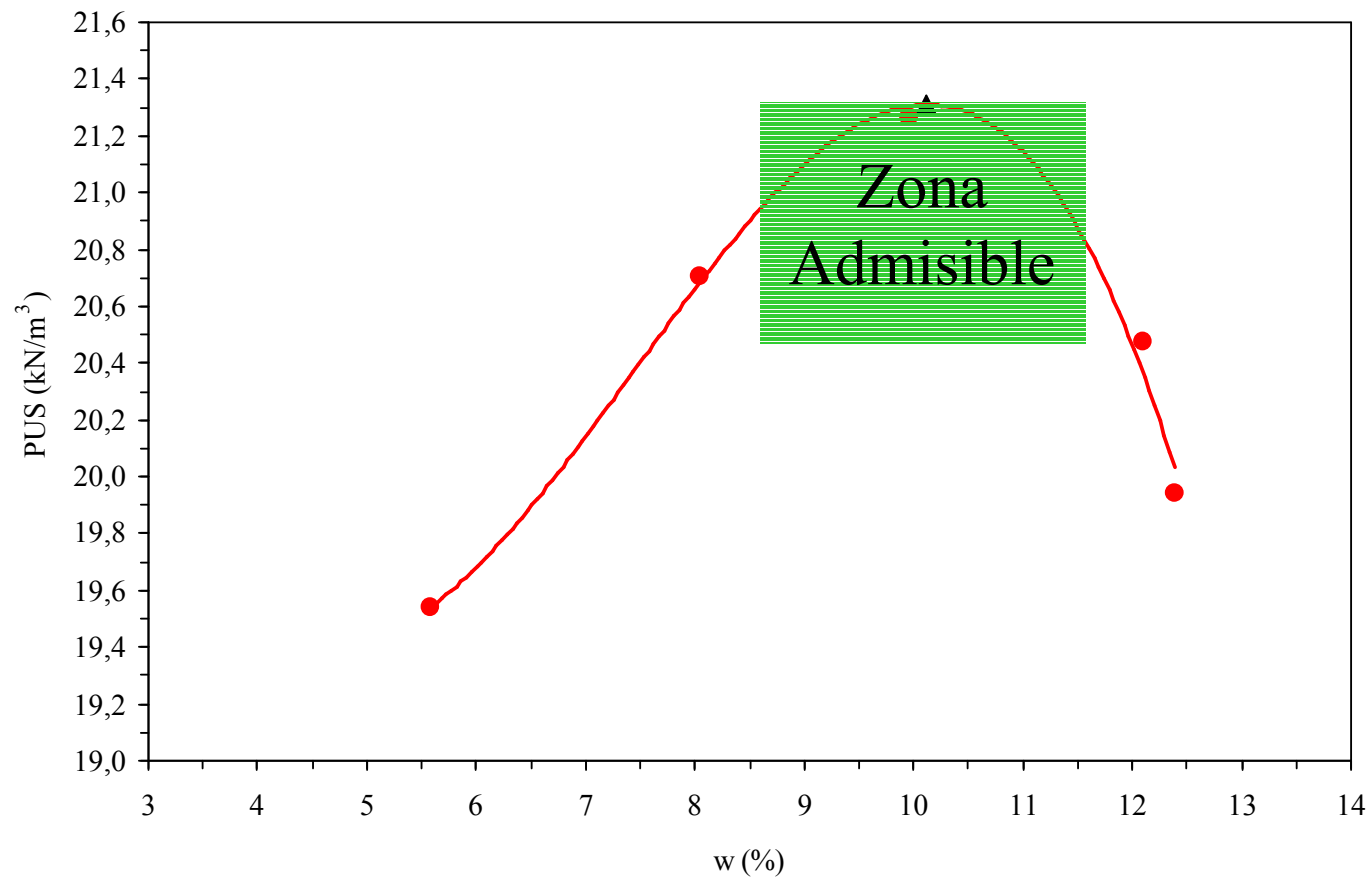
Efecto de Estructura de Suelos Finos Resistencia al Corte



Compactación en Campo

Grado de Compactación

$$GC (\%) = \frac{PUS}{PUSM} \cdot 100$$



Control de Compactación

Métodos Destructivos

Cono de Arena (ASTM D1556)
Aceite
Balón de Goma (ASTM D2167)

Métodos No Destructivos

Densímetro Nuclear (ASTM D2922)
Densímetro Gravimétrico
Viga Benkelman

Métodos Semidestructivos

Penetrómetro de Cono Dinámico
(DCP)

Método del Cono de Arena



$$V_{\text{pozo}} = \frac{P_i - P_f - P_c}{\gamma_{\text{d arena}}} = \frac{P_i - P_f}{\gamma_{\text{d arena}}} - V_c$$

$$P_c = \gamma_{\text{d arena}} \cdot V_c$$

P_i : Peso inicial de Arena

P_f : Peso final de Arena

P_c : Peso de arena en cono

V_c : Volumen del cono

$$\gamma_{\text{suelo}} = \frac{P_{\text{suelo}}}{V_{\text{pozo}}}$$

Densímetros



Más precisos
Control instantáneo



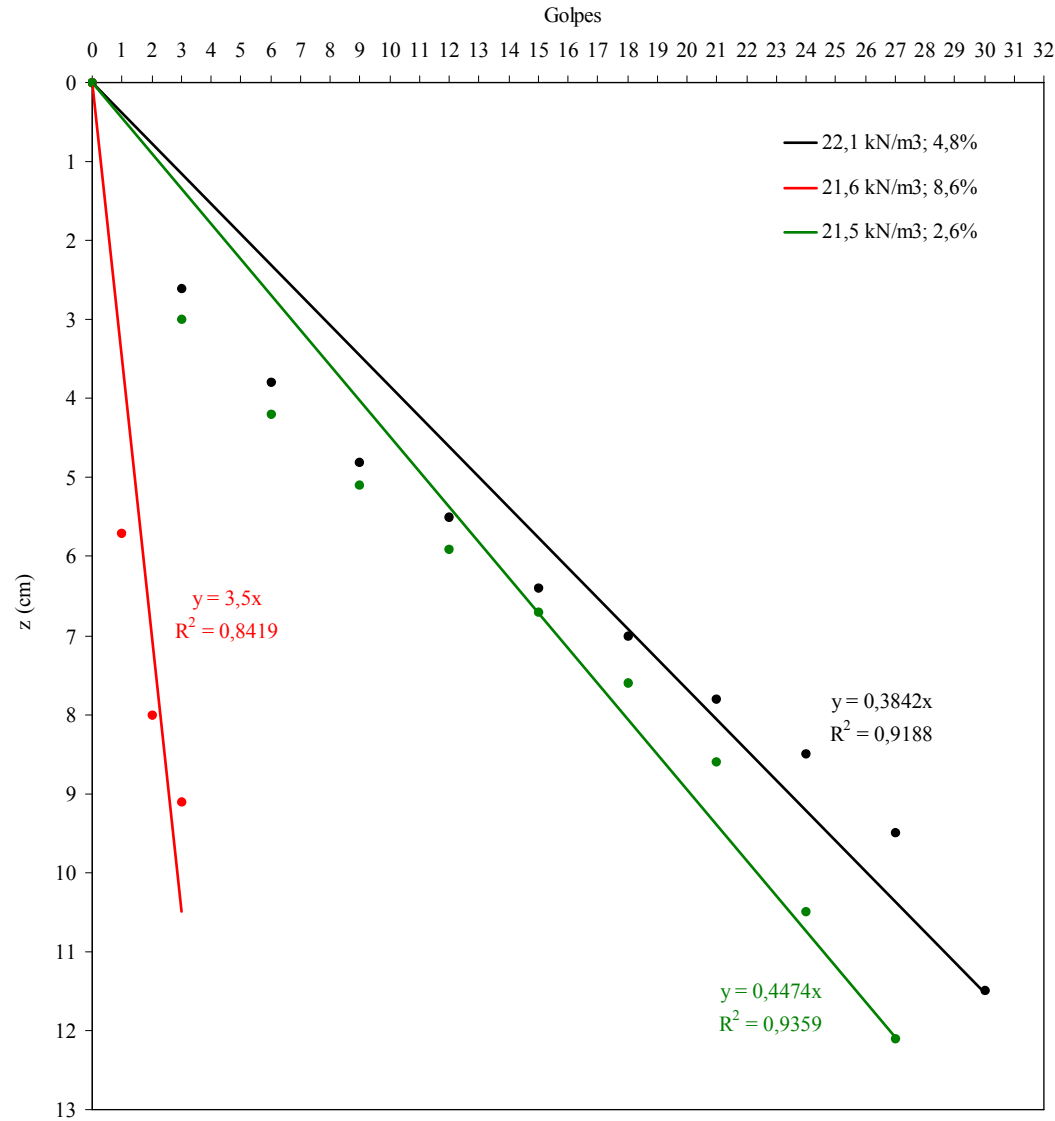
Viga Benkelman (1953)



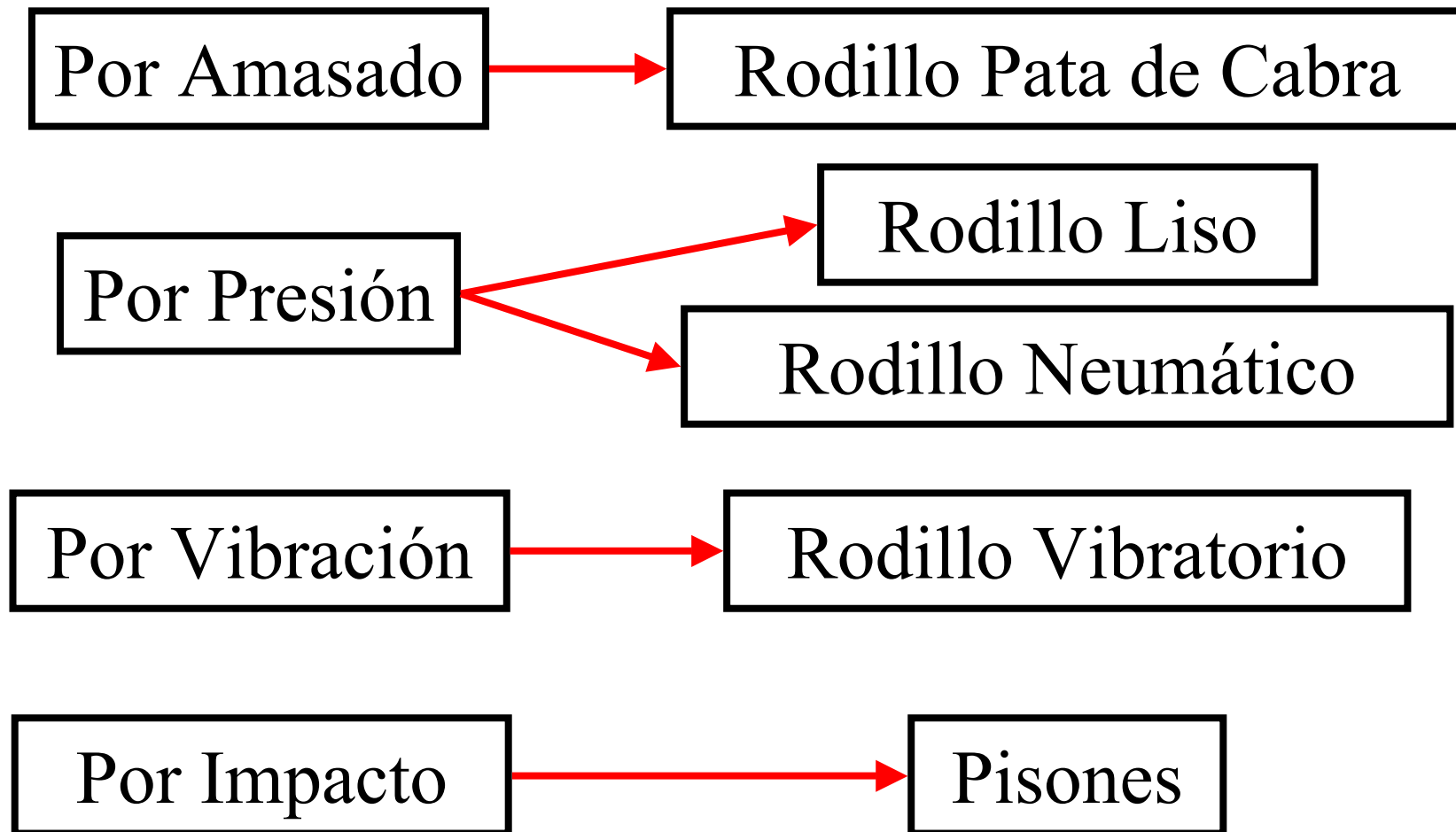
- Deflexión por recuperación elástica
- Camión con eje trasero de 8,2 ton (80 kN) y presión de inflado de ruedas tandem de 80 psi (550 kPa)
- Control por deflexiones admisibles
- Conocimiento de Módulos



Penetrómetro de Cono Dinámico(DCP)



EQUIPOS COMPACTADORES



Compactadores por Presión Rodillo Liso Materiales Gruesos

Factores que afectan desempeño

- Peso
- Ancho
- Diámetro del rodillo



Se clasifican por la masa por unidad de ancho (m)

Rodillo Liso

Relaciones de m con PUS y HOC

- GC aumenta y w disminuye con aumento de m

Suelo	Regresión
Arcilla muy plástica y Arcilla limosa	$c = 56m^{0,075}$ $w = 1620m^{-0,67} - 10$
Arcilla arenosa	$c = 48,6m^{0,089}$ $w = 143m^{-0,32} - 10$
Arena bien graduada y Grava-Arena-Arcilla	$c = 69,7m^{0,051}$ $w = 34,1m^{-0,17} - 10$

c: Máximo GC respecto a energía Proctor normal

w: $HOC_{rodillo} - HOC_{Proctor normal}$

Rodillo tandem: $m = (m_1 \times m_2)^{1/2}$

Rodillo Liso

Relaciones de Estado de Compactación y Número de Pasadas (N)

- A igual N, GC aumenta con aumento de m
- Con aumento de w, N para alcanzar igual GC disminuye

Suelo	Regresión
Arcilla muy plástica y Arcilla limosa	(a) $p = 7,24 - 1,80M - 0,020w$ (b) $p = 7,09 - 1,74M - 0,098w$
Arcilla arenosa	(a) $p = 4,83 - 1,08M - 0,116w$ (b) $p = 5,40 - 1,25M - 0,209w$
Arena bien graduada y Grava-Arena-Arcilla	(a) $p = 5,71 - 1,53M - 0,213w$ (b) $p = 6,40 - 1,73M - 0,327w$

p: \log_{10} (N) necesario para alcanzar:

- (a): GC = 95% de Proctor normal
- (b): S = 90%

$M = \log_{10}$ (m)

w (%) = $w_{\text{suelo}} - \text{HOC}_{\text{normal}}$

Rodillo Liso

Relaciones entre Estado de Compactación y Profundidad dentro de Capa Compactada

- A medida que w del suelo aumenta, disminuye el gradiente de GC (taza de disminución de PUS con aumento de profundidad respecto a la superficie de capa)
 - Si GC exigido en el tope de capa es de 95%, se puede aceptar que en el fondo de la misma sea de 90%

Compactadores por Presión Rodillo Neumático

Factores que afectan desempeño

- Carga por rueda
- Presión de contacto del neumático (combinación de carga por rueda, presión de inflado de neumáticos y características del neumático)



Relaciones con PUS y HOC

- c aumenta y w disminuye con aumento de carga por rueda y/o presión de inflado de neumáticos
- Influencia de presión de contacto en c y en w es mayor en suelos arcillosos que en granulares

Rodillos Neumáticos

Regresiones entre Estado de Compactación y Número de Pasadas (N)

Suelo	Regresión
Arcilla muy plástica	(a) $P = 6,38 - 2,19p - 0,72w$ (b) $P = 8,38 - 2,97p - 0,227w$
Arcilla arenosa	(a) $P = 8,46 - 3,09p - 0,186w$ (b) $P = 11,34 - 4,22p - 0,458w$
Arena bien graduada y Grava-Arena-Arcilla	(a) $P = 3,62 - 1,33p - 0,319w$ (b) $P = 2,71 - 0,993p - 0,458w$

P: \log_{10} (N) necesario para alcanzar:

- (a): GC = 95% de Proctor normal
- (b): S = 90%

p = \log_{10} de presión de contacto (kPa)

Rodillos Neumáticos

Regresiones entre Estado de Compactación y Profundidad dentro de Capa Compactada

Suelo	Regresión
Arcilla muy plástica	(a) $D = 128L^{0,486}$ (b) $D = 107L^{0,423}$
Arcilla arenosa	(a) $D = 121L^{0,590}$ (b) $D = 92,7L^{0,597}$
Arena bien graduada y Grava-Arena-Arcilla	(a) $D = 206L^{0,200}$ (b) $D = 200L^{0,184}$

D (mm): Máxima profundidad de capa para alcanzarse

- (a): $G_c = 90\%$ de Proctor normal
- (b): $S = 85\%$

L: Carga por rueda (tf)

Compactadores por Amasado Rodillo Pata de Cabra Suelos Finos

- Elevadas tensiones de contacto
- Varias pasadas para tener cobertura completa en faja por tener pequeña área de contacto



- Distribución de tensiones en profundidad débil, compensada por la acentuada penetración de los pies

Rodillo Pata de Cabra
Relaciones de m con PUS y HOC

Suelo	Regresión
Arcilla muy plástica y Arcilla limosa	$c = 57,4m^{0,0632}$ $w = 580m^{-0,37} - 20$
Arcilla arenosa	$c = 86,3m^{0,0184}$ $w = 51,8m^{-0,187} - 10$
Arena bien graduada y Grava-Arena-Arcilla	$c = 174m^{0,0535}$ $w = 250m^{-0,351} - 10$

m: Masa por unidad de ancho efectivo

Ancho Efectivo = Ancho General x Cobertura

Cobertura: suma de áreas finales de pata expresada como proporción de área de cilindro barrido por extremos de la pata

- Arena bien graduada y Grava-arena-arcilla: aumento de m reduce c. Estos tipos de suelos no deben ser compactados con pata de cabra

Rodillos Pata de Cabra

Factores que influyen en número de pasadas

- Cobertura: baja cobertura exigirá mayor N
- Masa por unidad de ancho efectivo (m) (depende de cobertura): Cuanto mayor la masa por unidad de ancho efectivo, mayor grado de compactación)
- Humedad del suelo respecto a HOC de laboratorio (w)

Rodillo Pata de Cabra

Relaciones entre Estado de Compactación y Número de pasadas

Suelo	Regresión
Arcillas muy plásticas y arcillas limosas	(a) $p = 4,56 - 1,918m - 0,403c - 0,0569w$
Arcillas arenosas	(a) $p = 4,71 - 1,01m - 0,647c - 0,0899w$ (b) $p = 5,63 - 1,24m - 0,877c - 0,171w$
Arenas bien graduadas y Gravas-Arena-Arcillas	(a) $p = 0,753 - 0,112m - 0,493c - 0,243w$

p : \log_{10} de N necesario para alcanzar

(a): $G_c = 95\%$ de Proctor normal

(b): $S = 90\%$

$m = \log_{10}$ de masa por unidad de ancho efectivo (kg/m)

$c = \log_{10}$ de cobertura

Compactadores por Vibración Rodillo Vibratorio Materiales Gruesos Mal Graduados

Mecanismos Vibratorios:

- Masas Desbalanceadas
- Hidráulicos Pulsativos

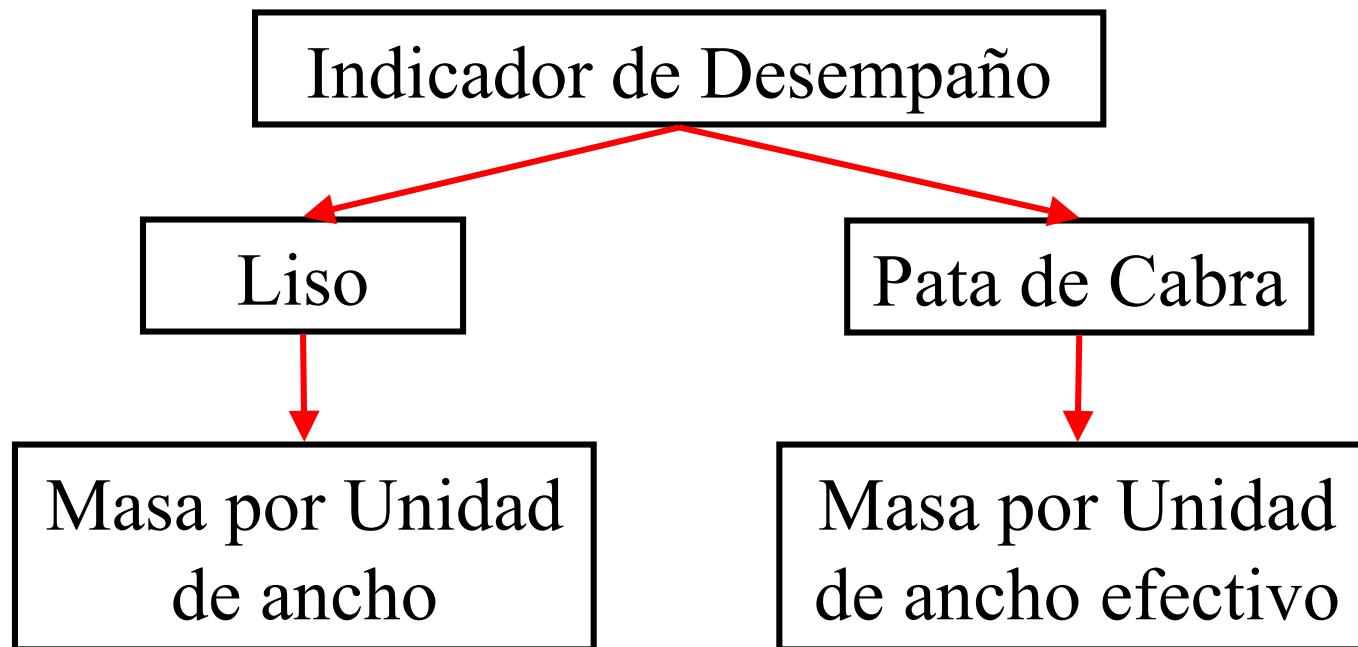
Factores que afectan desempeño:

- Masa total
- Masa de componentes vibratorios y no vibratorios
- Ancho
- Frecuencia de vibración
- Masa de sistema excéntrico
- Características de suspensión



Rodillo Vibratorio

Fuerzas dinámicas dependen de la masa del equipamiento



Rodillo Vibratorio Liso

Relaciones de m con PUS y HOC

Suelo	Regresión
Arcillas muy plásticas	$w = 80,9m^{-0,274} - 10$
Arcillas arenosas	$w = 17,6m^{-0,092} - 10$
Suelos arcillosos en general	$c = 61,0m^{0,068}$
Arenas bien graduadas	$w = 17,7m^{-0,101} - 10$
Gravas-Arena-Arcillas	$w = 14,7m^{-0,087} - 10$
Suelos granulares bien graduados	$c = 79,8m^{0,038}$

Rodillo Vibratorio Pata de Cabra

Relaciones de m con PUS y HOC

Suelo	Regresión
Arcillas muy plásticas y Arcillas arenosas	$c = 60,0m^{0,0555}$ $w = 607m^{-0,450} - 10$
Arenas bien graduadas y Gravas-Arena-Arcillas	$c = 98,2m^{-0,00324}$ $w = 7,69m^{0,147} - 10$

Rodillo Vibratorio Liso

Regresiones Entre Estado de Compactación y Número de Pasadas

Suelo	Regresión
Arcillas	(a) $P = 6,35 - 1,68m - 0,0560w$ (b) $P = 7,30 - 1,94m - 0,163w$
Arenas bien graduadas	(a) $P = 3,44 - 0,993m - 0,232w$ (b) $P = 3,74 - 1,09m - 0,350w$
Grava-Arena-Arcilla	(a) $P = 2,14 - 0,613m - 0,207w$ (b) $P = 3,27 - 1,12m - 0,423w$

P: \log_{10} de N necesario para alcanzar

(a): $G_c = 95\%$ de Proctor normal

(b): $S = 90\%$

m = \log_{10} de masa por unidad de ancho (kg/m)

Rodillo Vibratorio Pata de Cabra

Regresiones Entre Estado de Compactación y Número de Pasadas

Suelo	Regresión
Arcilla arenosa	(a) $P = 6,11 - 1,34m - 0,421w$
Gravas-Arena-Arcillas y Arena bien graduada	(a) $P = 1,35 - 0,181m - 0,176w$ (b) $P = 0,584 - 1,26m - 0,563w$

P: \log_{10} de N necesario para alcanzar

- (a): $G_c = 95\%$ de Proctor normal
- (b): $S = 90\%$

m = \log_{10} de masa por unidad de ancho efectivo (kg/m)