

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Compactación



FACULTAD DE
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Dr. Ing. Leonardo Behak
Instituto de Estructuras y Transporte

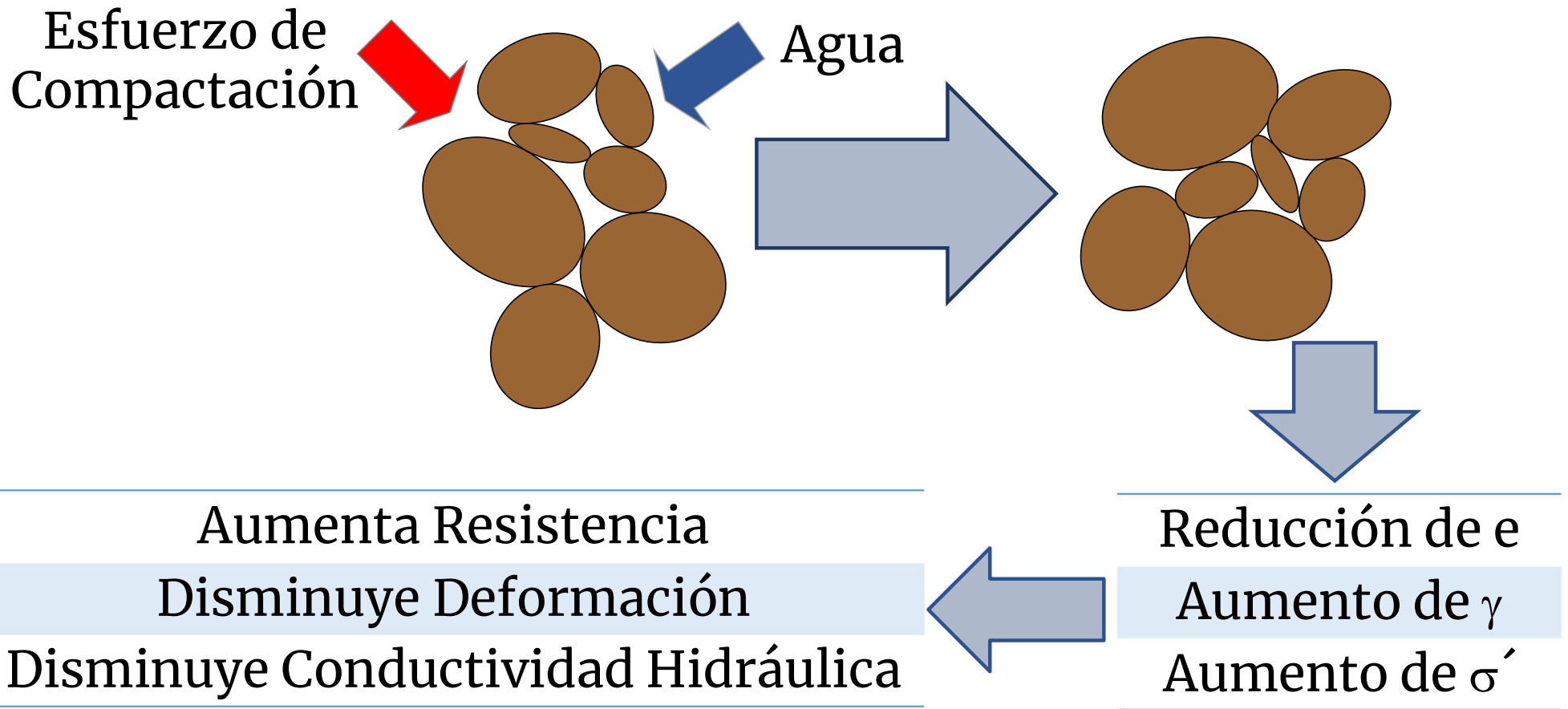
COMPACTACIÓN

Método mecánico de mejoramiento de las propiedades del suelo

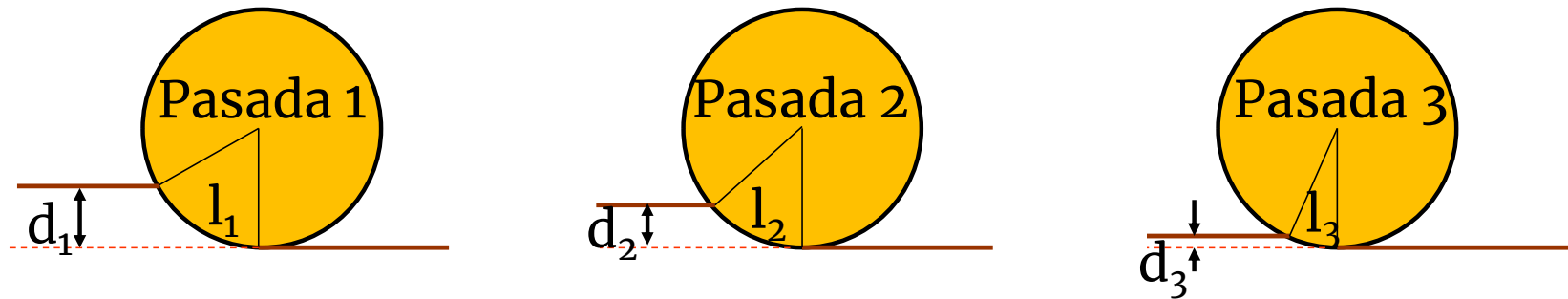
Reducción de volumen de suelo por reducción mediante la aplicación de energía mecánica



COMPACTACIÓN



COMPACTACIÓN



$l_3 < l_2 < l_1$: 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

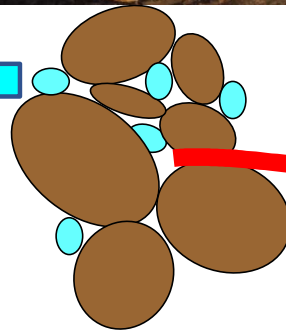
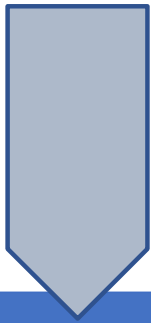
Aumenta tensión rasante

Disminuye asentamiento hasta hacerse despreciable

COMPACTACIÓN



Volumen de Agua
Constante



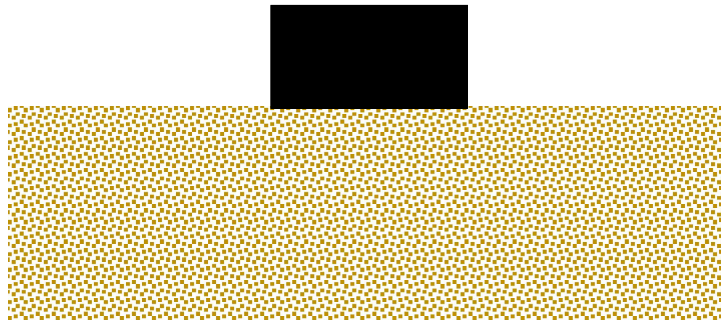
Reducción de
Volumen de Aire



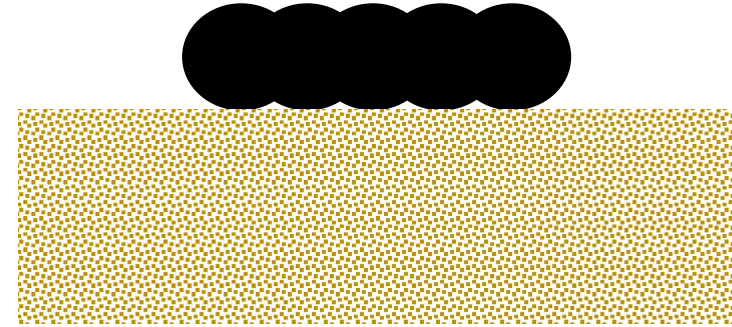
Compactación: Suelos no Saturados

MÉTODOS DE COMPACTACIÓN

Dinámico



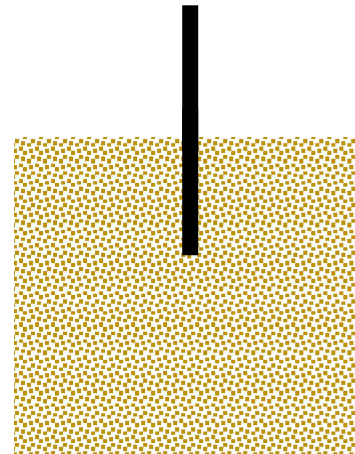
Amasado



Precarga



Vibrado



COMPACTACIÓN DINÁMICA

ENSAYOS PROCTOR

Proctor Normal (ASTM D698)

Masa = 5,5 lb (2,5 kg)
Altura = 12 inch (30,5 cm)
Número de Capas = 3

Proctor Modificado (ASTM D1557)

Masa = 10 lb (4,54 kg)
Altura = 18 inch (45,7 cm)
Número de Capas = 5

Diámetro: 6" (152,4 mm)

Tamaño Máximo: 3/4"

56 golpes/capa



Diámetro: 4" (101,6 mm)

Tamaño Máximo: 4,75 mm (#4)

25 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 VIBRACIÓN

Densidad Relativa de Arenas

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

e_{\max} : Vertido por caída libre mediante embudo (“lluvia de arena”)

e_{\min} : Vertido por caída libre mediante embudo (“lluvia de arena”) y adensado por golpes laterales con martillo de goma o neumático

Requiere criterios de D_r máximo o mínimo (según el caso)

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COMPACTACIÓN

Proctor (1933)

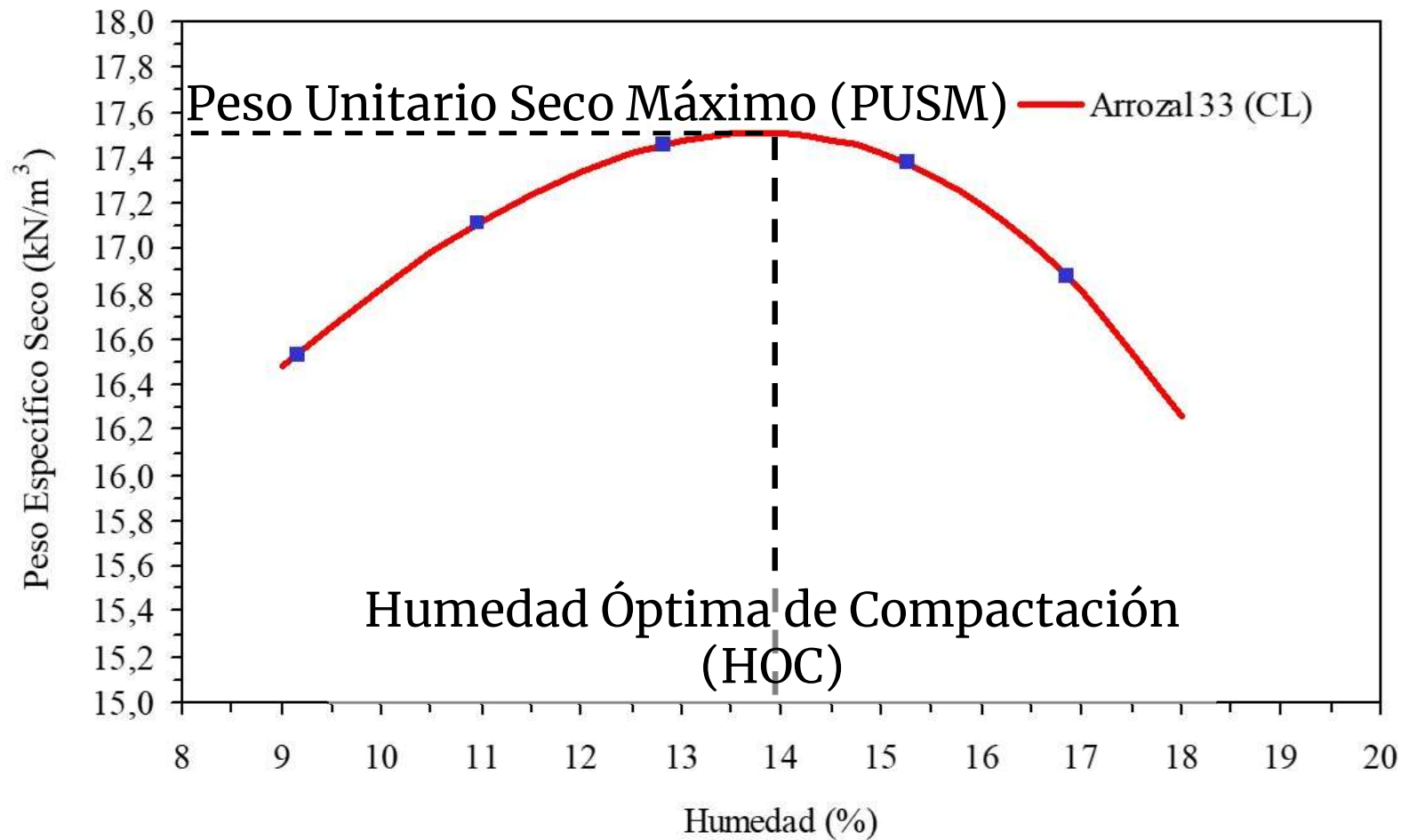
Humedad de Compactación

Energía de Compactación

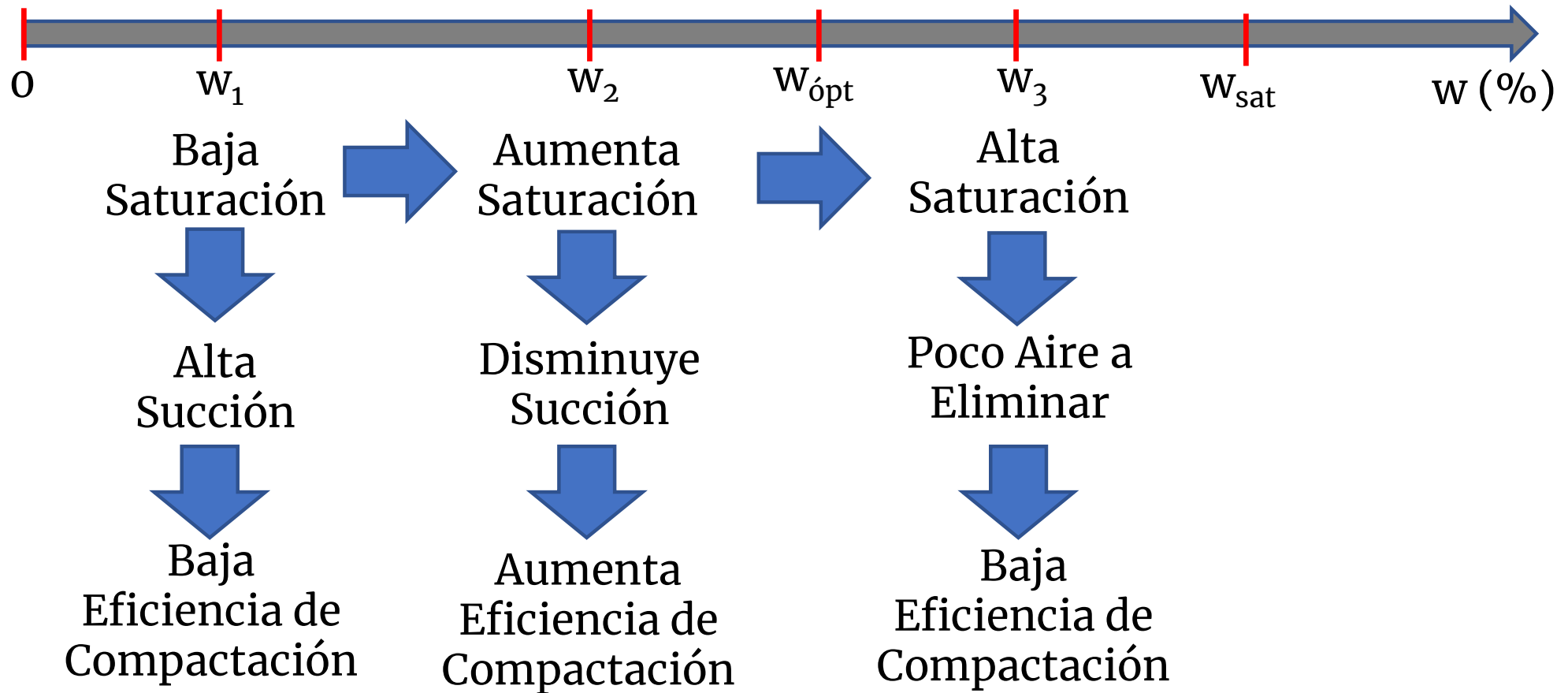
Tipo de Suelo

Volumen Compactado

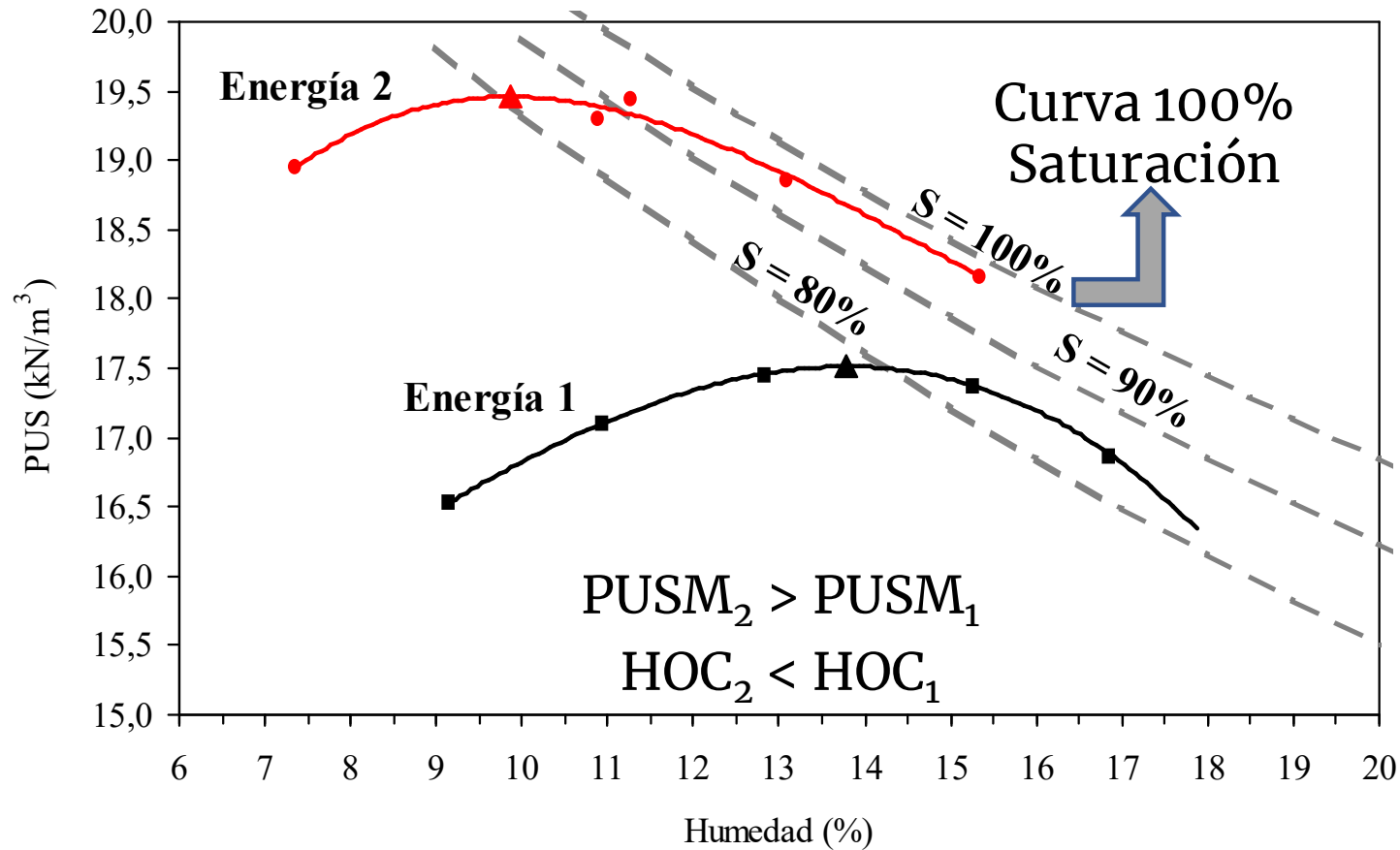
HUMEDAD DE COMPACTACIÓN



HUMEDAD DE COMPACTACIÓN

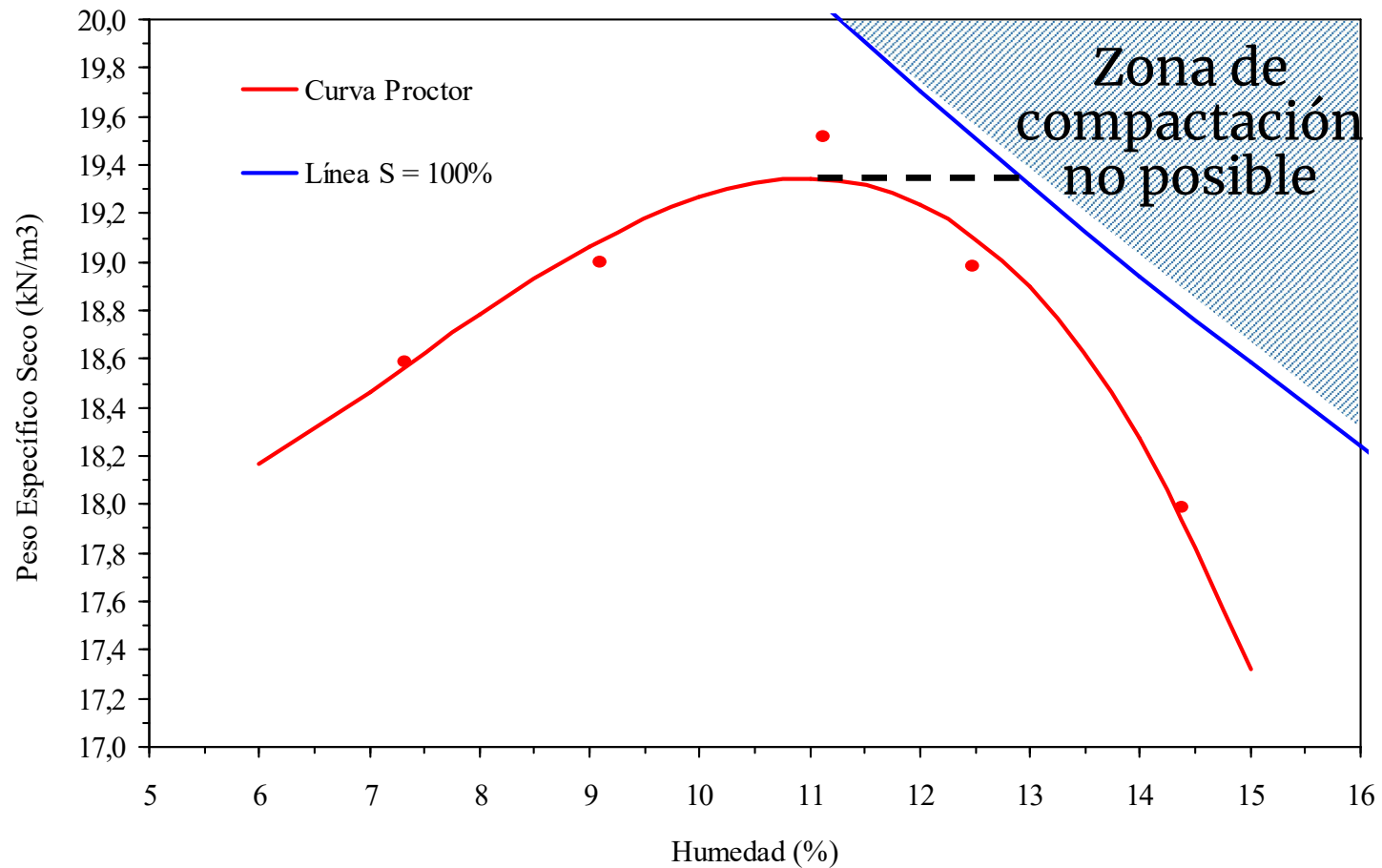


ENERGÍA DE COMPACTACIÓN

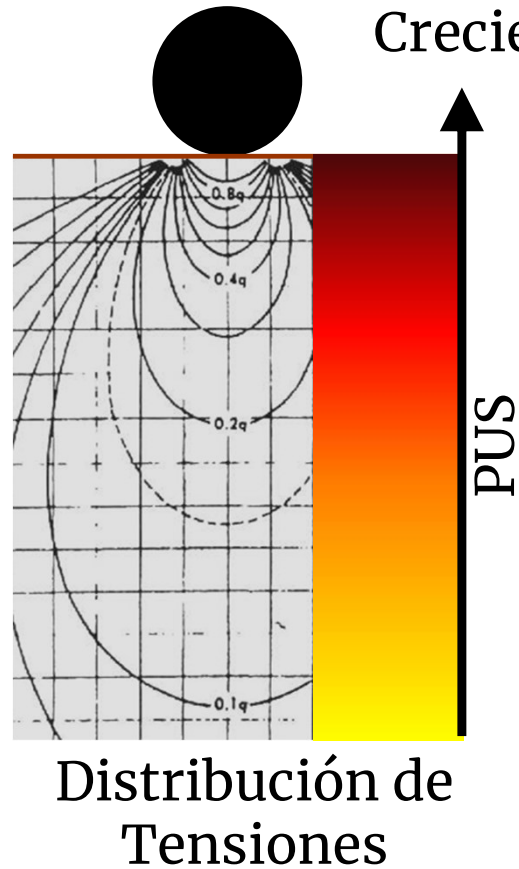


$$PUS = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + \frac{G \cdot w}{100}}$$

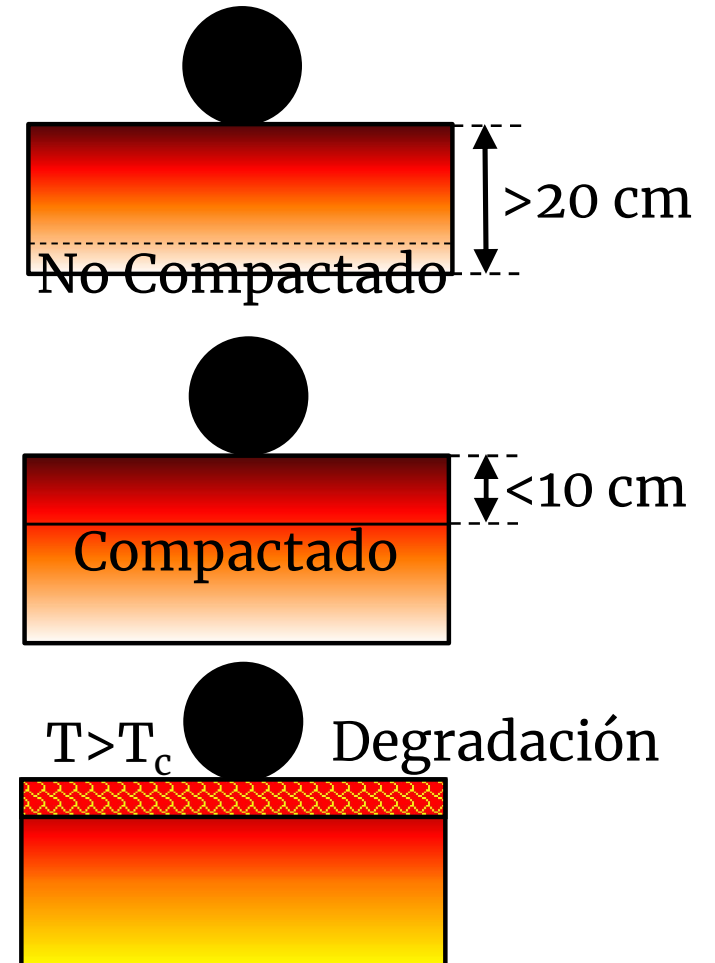
ENERGÍA DE COMPACTACIÓN



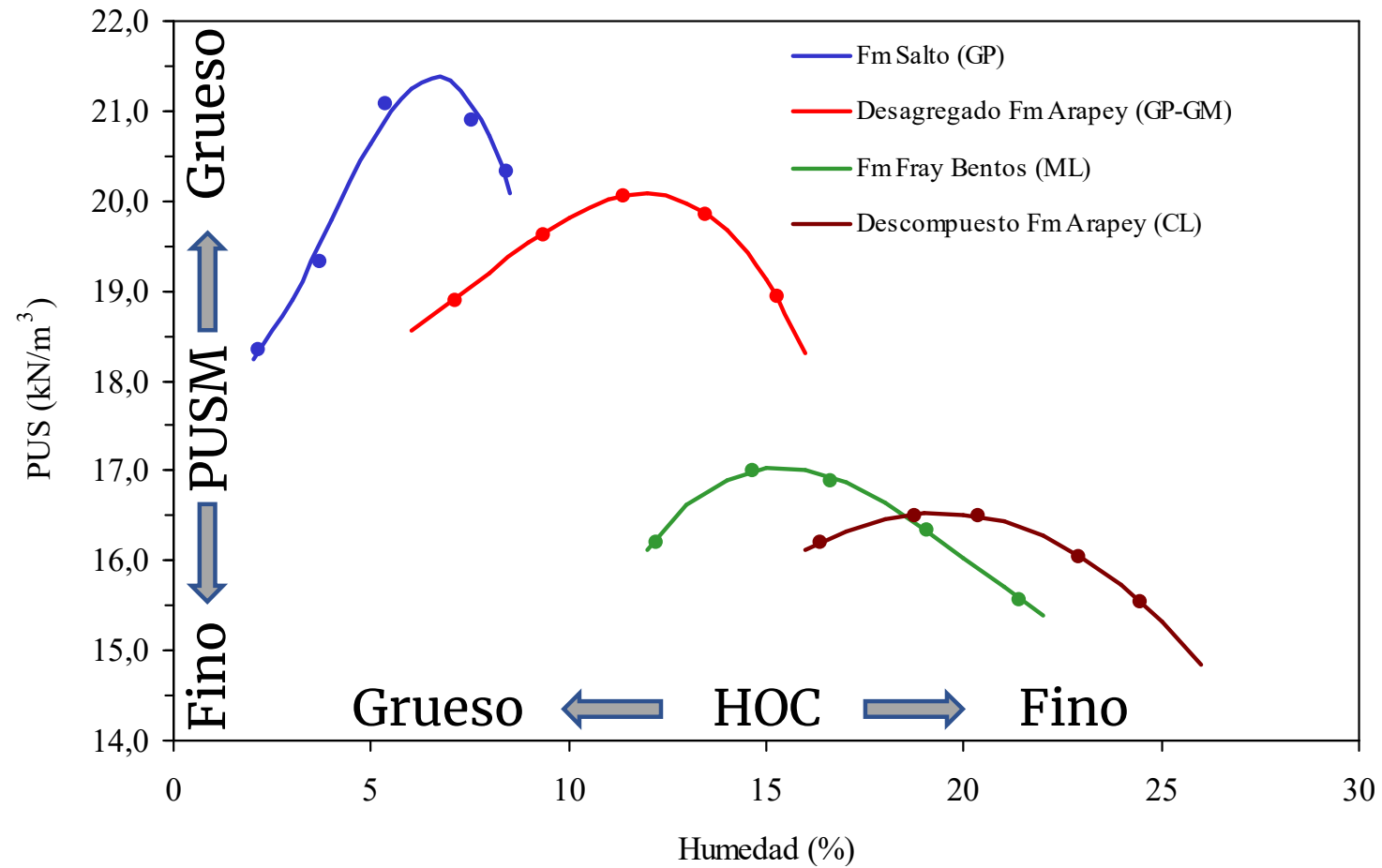
VOLUMEN DE COMPACTACIÓN



Grado Medio de Compactación

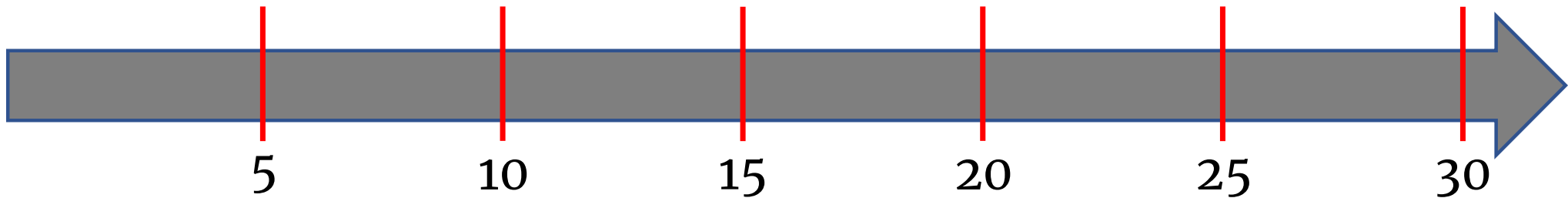


TIPO DE SUELO



TIPO DE SUELO

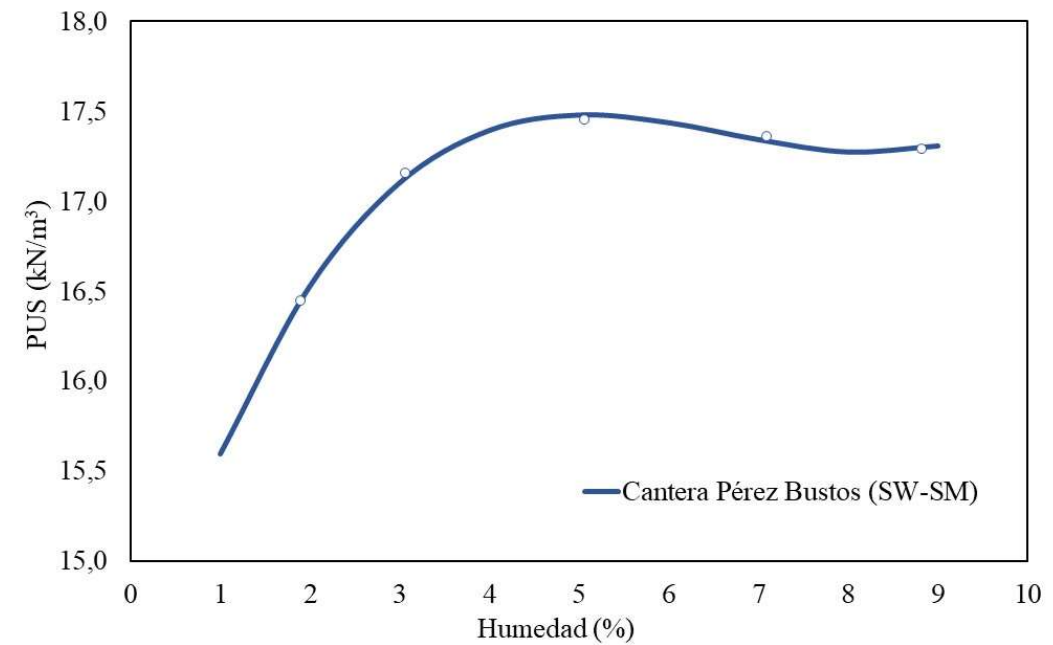
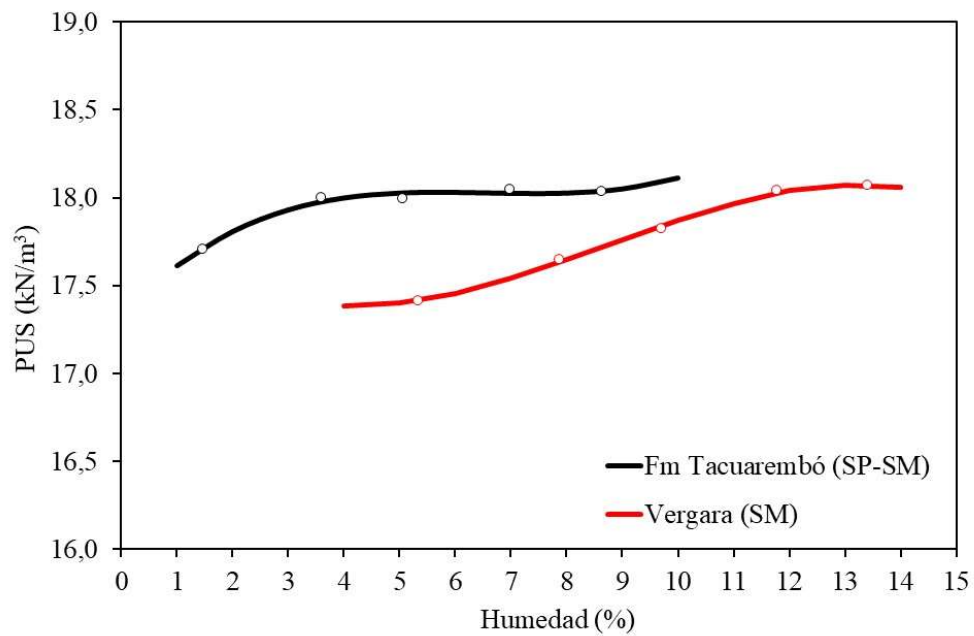
HOC (%)



Gravas	Gravas con Finos	Arenas con Finos	Arcillas	Arcillas Muy Plásticas
	Arenas Bien Graduadas	Limos		

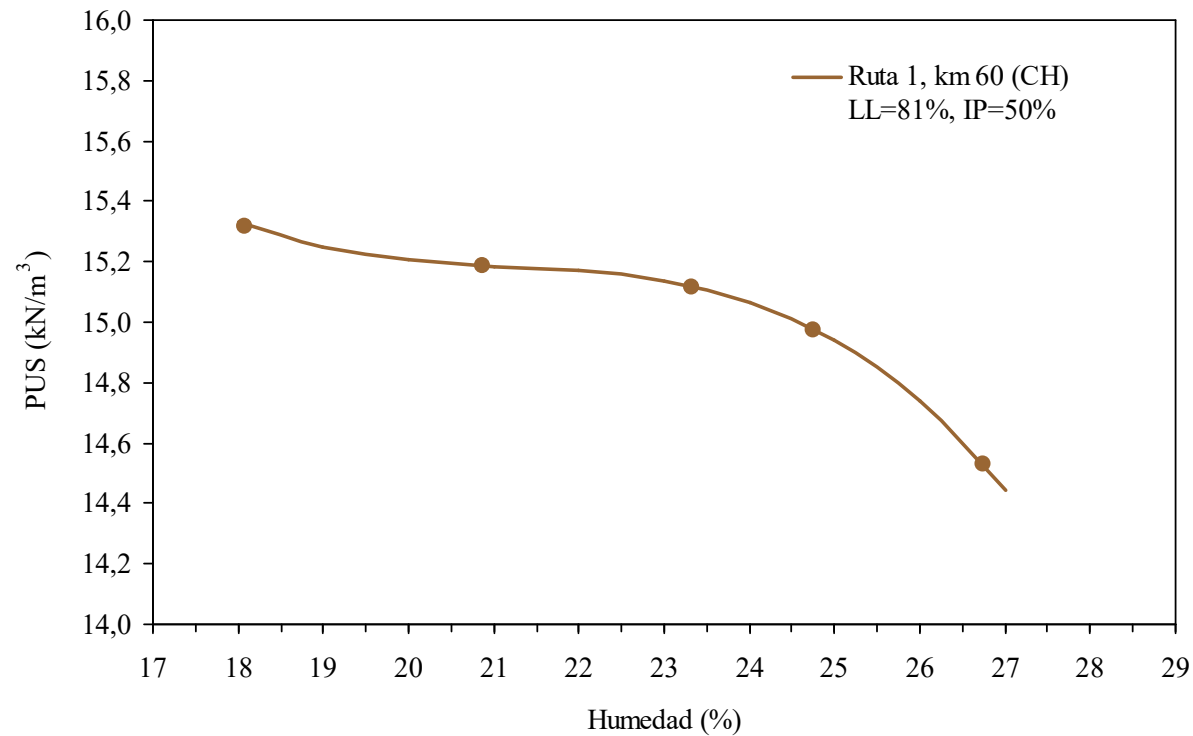
TIPO DE SUELO

Curvas de Compactación Sin Forma Arenas



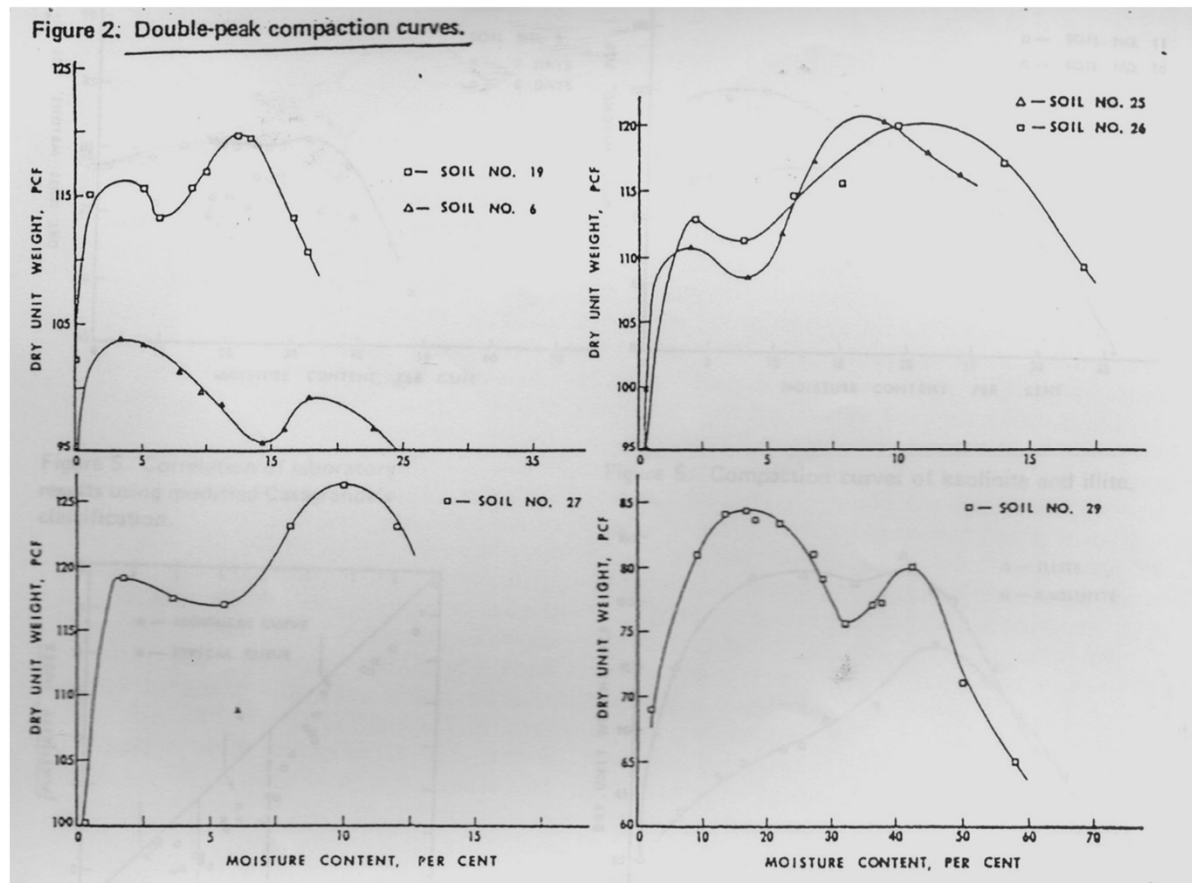
TIPO DE SUELO

Curvas de Compactación Sin Forma Arcilla Altamente Plástica



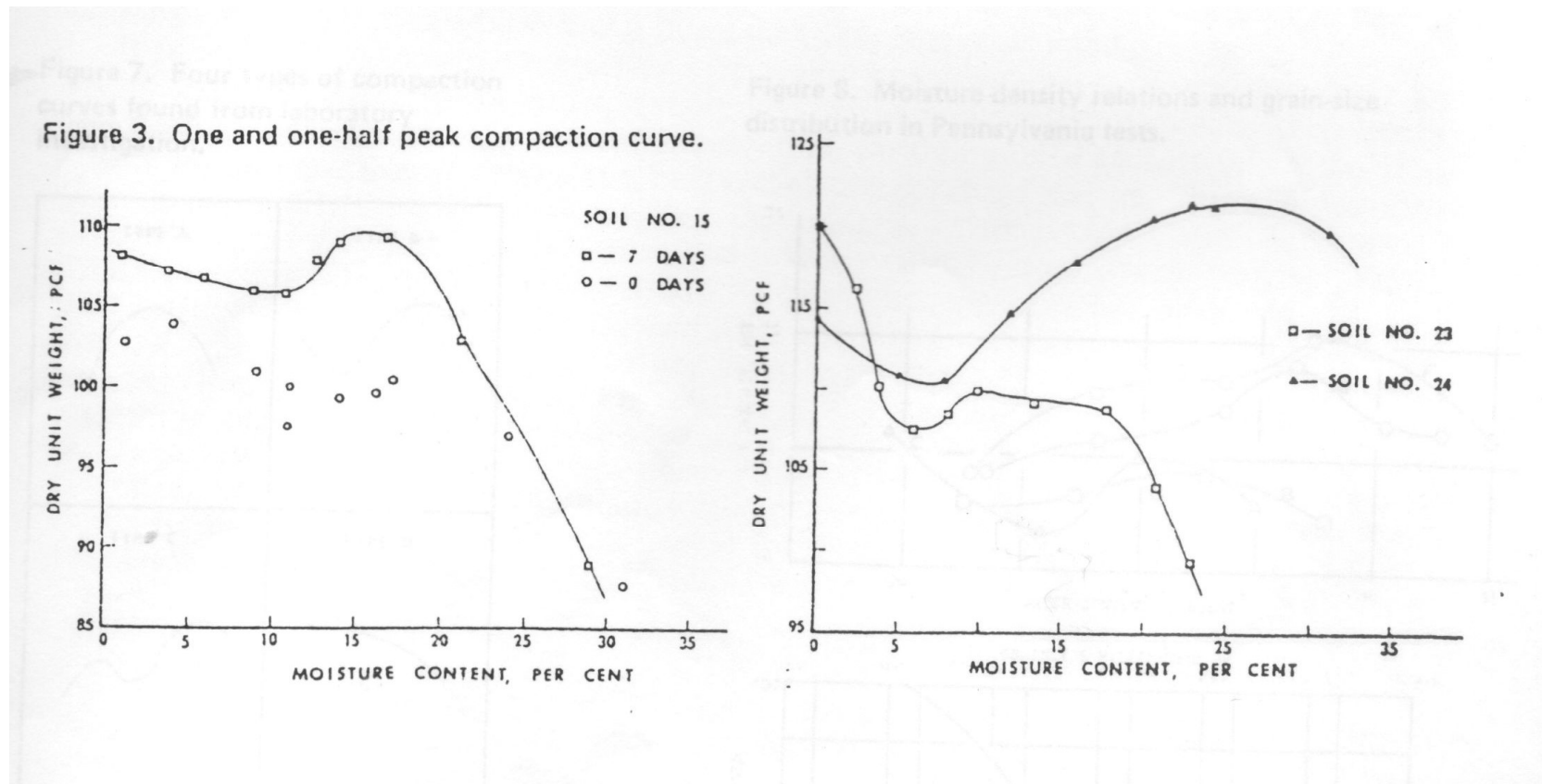
TIPO DE SUELO

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



TIPO DE SUELO

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



TIPO DE SUELO

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

SUELO	CURVA DE COMPACTACIÓN
$30\% < LL < 70\%$	1 Pico
$LL > 70\%$ (Illitas, Montmorillonita)	2 Picos Sin Forma
$LL < 30\%$ (Caolinita)	2 Picos $1\frac{1}{2}$ Pico
Arenas y Gravas Mal Graduadas	Sin Forma

COMPACTACIÓN DE ARCILLAS

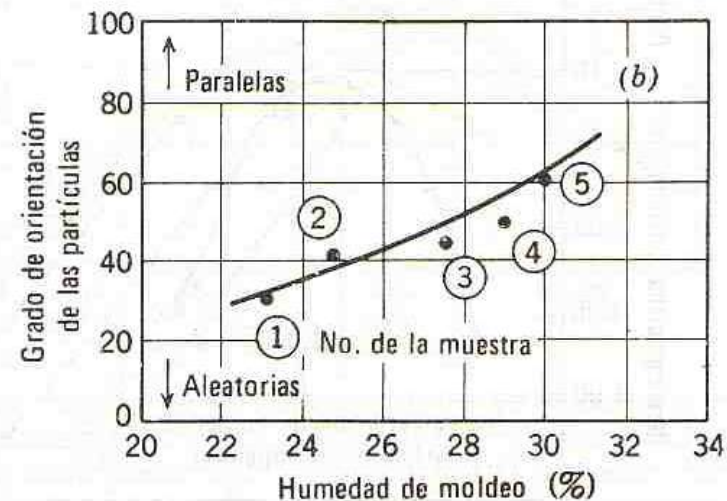
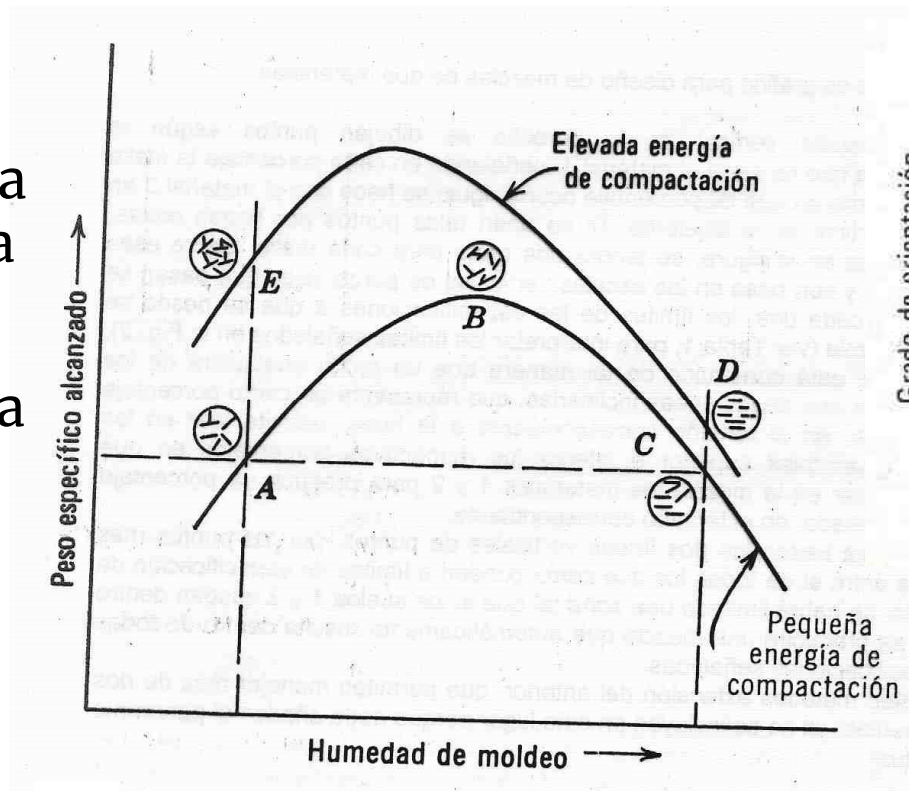
Efecto en la Estructura



Estructura Floculada

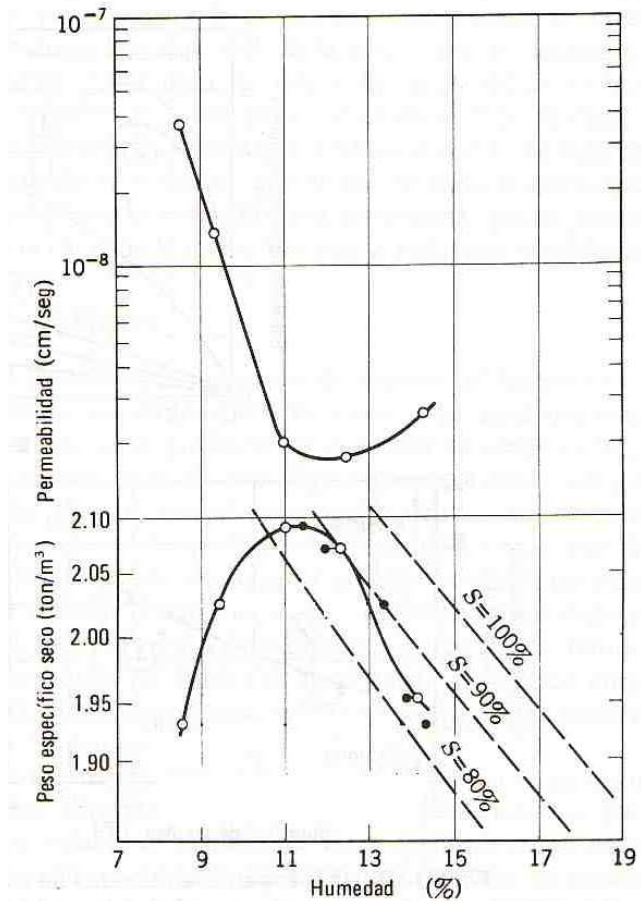


Estructura Dispersa



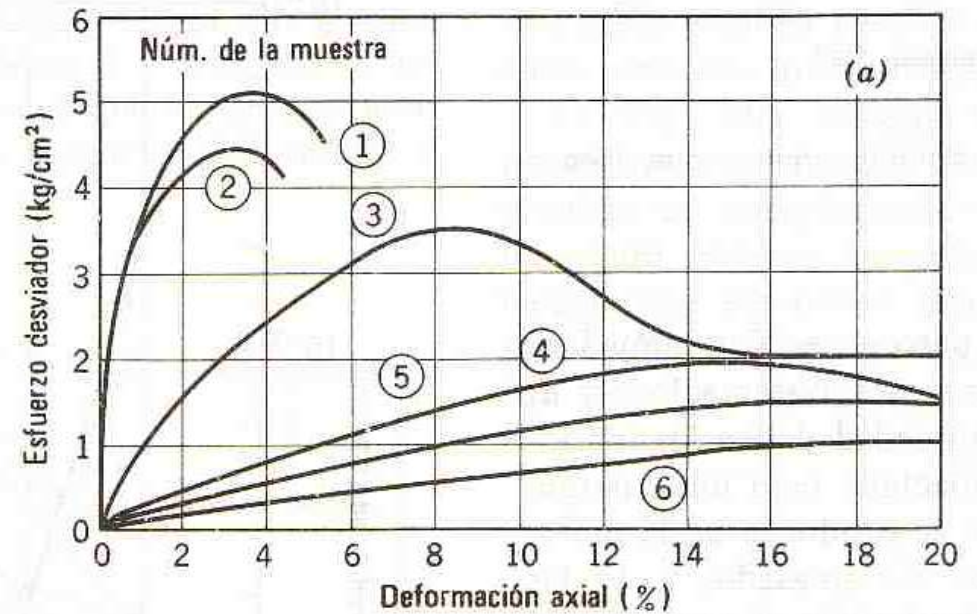
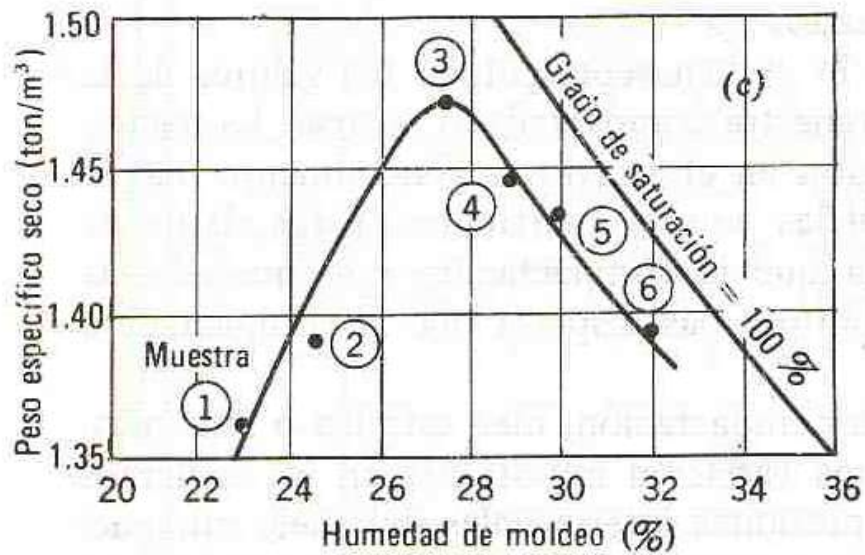
COMPACTACIÓN DE ARCILLAS

Efecto de la Estructura en la Conductividad Hidráulica



COMPACTACIÓN DE ARCILLAS

Efecto de la Estructura en la Resistencia al Corte



COMPACTACIÓN EN CAMPO

Diferencias Entre Compactación de Laboratorio y Campo

	LABORATORIO	CAMPO
ESFUERZO	Impacto	Amasado (Rodillos) Vibrado
HUMEDAD	Controlada	No Controlada

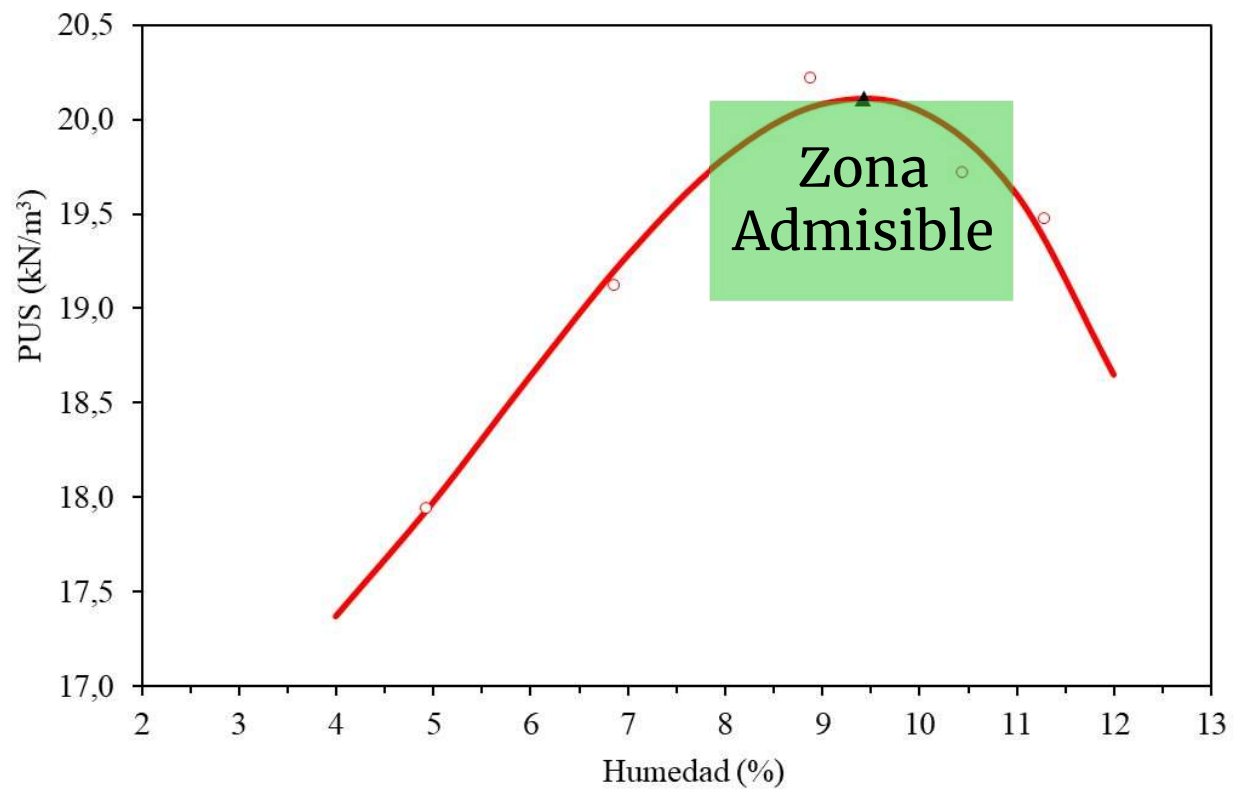
Resultado

Dificultad en campo de alcanzar el PUSM y tener HOC en toda la extensión de compactación

COMPACTACIÓN EN CAMPO

Grado de Compactación (GC)

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



CONTROL DE COMPACTACIÓN

Métodos de Control de Compactación

Destructivos	Cono de Arena (ASTM D1556) Método del Aceite Balón de Goma (ASTM D2167)
No Destructivos	Densímetro Nuclear (ASTM D2922) Densímetro Gravimétrico Viga Benkelman (AASHTO T256)
Semidestructivos	Penetrómetro de Cono Dinámico (DCP)

CONTROL DE COMPACTACIÓN

Densidad in Situ por el Método del Cono de Arena



$$V_p = \frac{P_i - P_f}{\gamma_{\text{darena}}} - V_c$$

$$P_{ss} = \frac{P_{hs}}{1 + w}$$

$$PUS = \frac{P_{ss}}{V_p}$$

V_p : Volumen del Pozo

P_i : Peso de Arena inicial

P_f : Peso de Arena final

γ_{darena} : Densidad de Arena

V_c : Volumen del cono

P_{ss} : Peso Seco del Suelo

P_{hs} : Peso Húmedo del Suelo

w : Humedad del Suelo

PUS: Peso Unitario Seco

CONTROL DE COMPACTACIÓN

Densímetros

Más precisos
Control instantáneo



Densímetro
Nuclear



Densímetro
Gravimétrico

CONTROL DE COMPACTACIÓN

Viga Benkelman (1953)



Medida de Deflexión (Recuperación Elástica) producida por un Camión con eje trasero simple de 8,2 ton (≈ 82 kN) y ruedas tandem con presión de inflado de 80 psi (≈ 550 kPa)

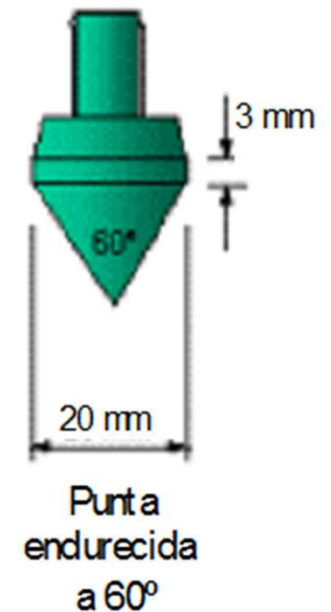
CONTROL DE COMPACTACIÓN

Penetrómetro de Cono Dinámico (DCP)

Resistencia a la penetración de un cono por impacto de una masa de 8 kg de peso desde una altura de caída libre de 575 mm

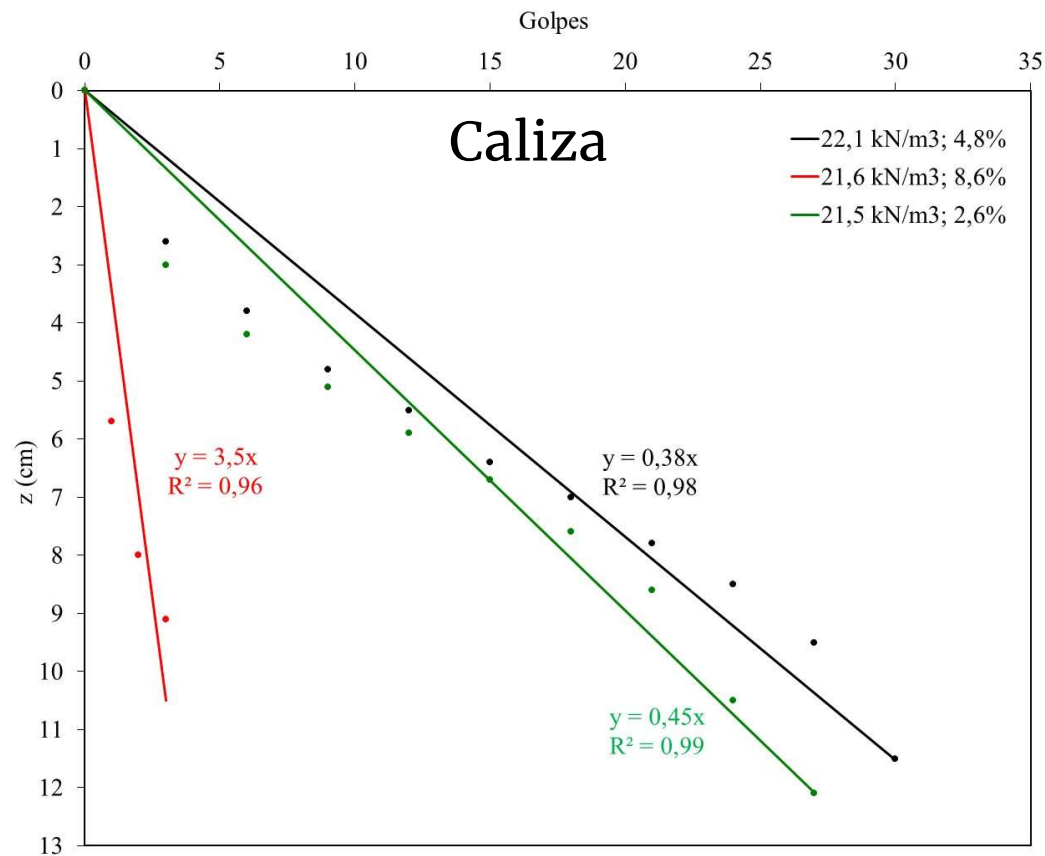
$$IP = \frac{\Delta}{N} \quad \text{Índice de Penetración}$$

Δ : Penetración del Cono
N: Número de Golpes



CONTROL DE COMPACTACIÓN

DCP



EQUIPOS DE COMPACTACIÓN

ESFUERZO DE COMPACTACIÓN	EQUIPO
Amasado	Rodillo Pata de Cabra Rodillo Liso Rodillo Neumático
Vibrado	Rodillo Vibratorio Vibrador Varillado
Impacto	Pisones

RODILLO LISO

Factores Que Afectan Desempeño

Masa del Rodillo

Ancho del Rodillo

Diámetro del Rodillo

Usualmente se caracterizan por la masa por unidad de ancho

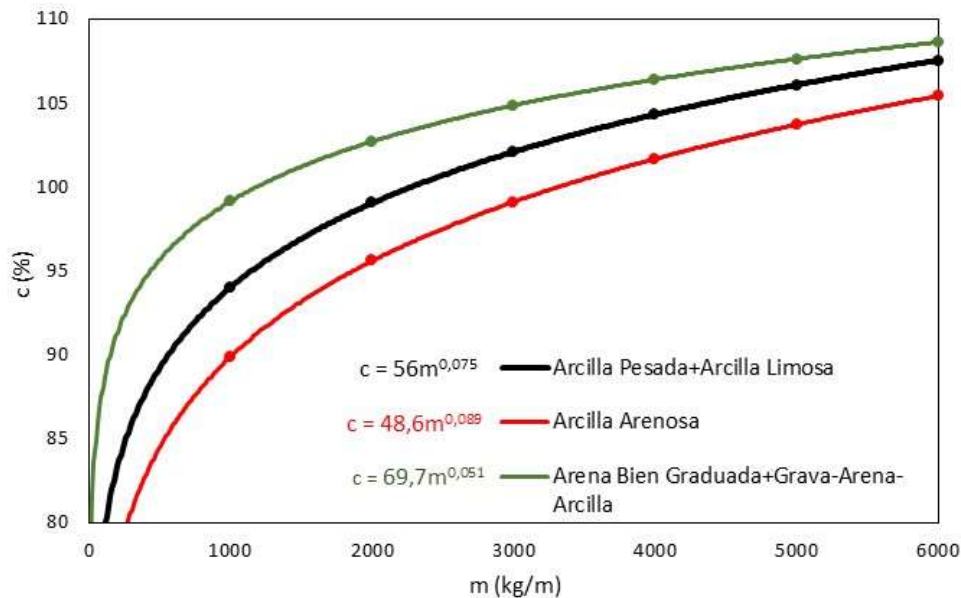
$$m = \frac{M}{L}$$

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

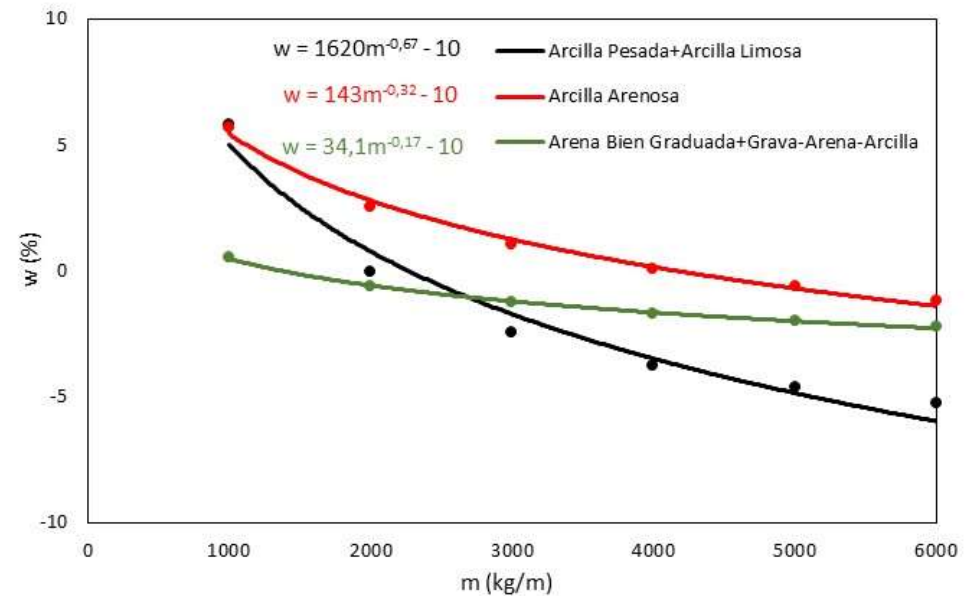


RODILLO LISO

Relación de la Masa por Unidad de Ancho con PUS y HOC



c : GC Máximo respecto a Energía Proctor Normal

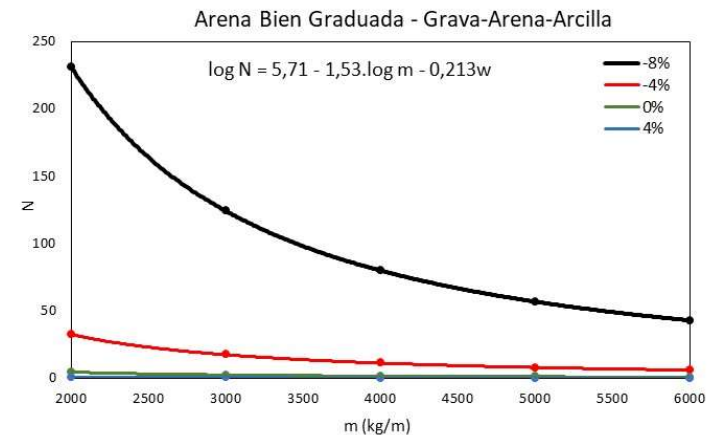
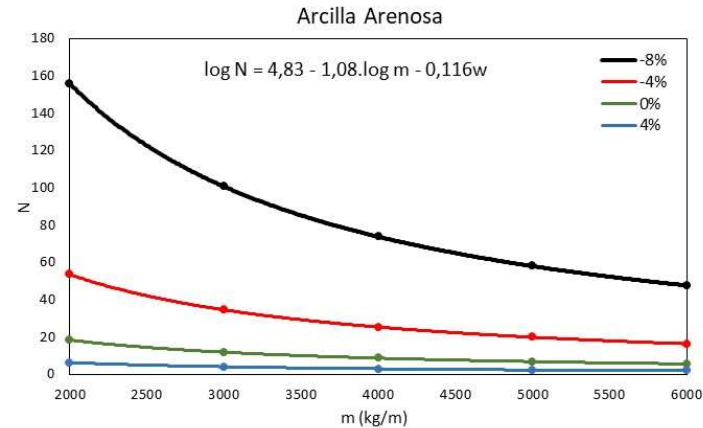
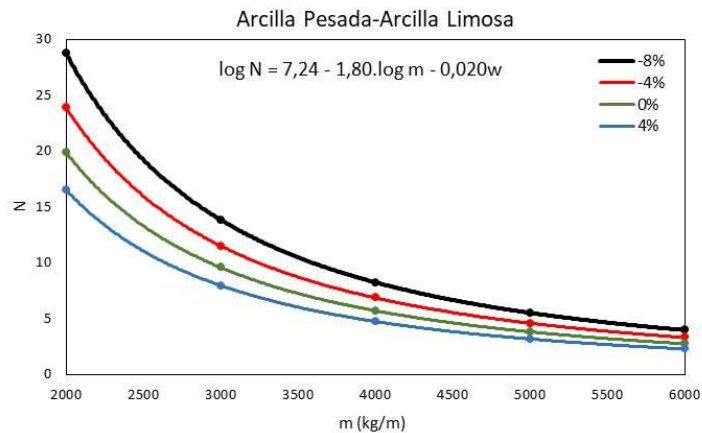


w : $HOC_{in-situ} - HOC_{Proctor normal}$

GC aumenta y HOC disminuye con aumento de masa por unidad de ancho (m)

RODILLO LISO

Relación Entre Estado de Compactación y Número de Pasadas



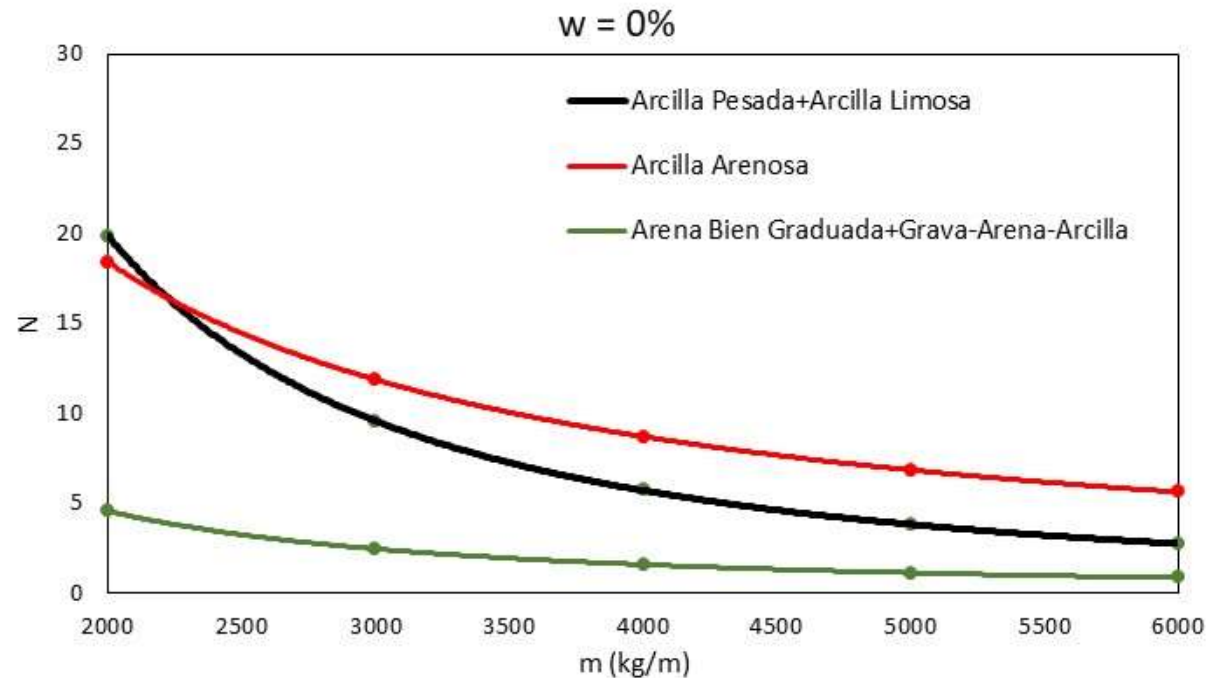
N: Número de pasadas para alcanzar
95% del $GC_{\text{Proctor Normal}}$

w (%): $HOC_{\text{in-situ}} - HOC_{\text{Proctor Normal}}$

A igual N, GC aumenta con aumento de m
A menor w, menor N para alcanzar igual GC

RODILLO LISO

Relación Entre Estado de Compactación y Número de Pasadas



Método de compactación más eficiente para suelos gruesos bien graduados

RODILLO LISO

Relación Entre el Estado de Compactación y Profundidad Dentro de la 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%

RODILLO NEUMÁTICO

Factores Que Afectan el Desempeño

Carga por Rueda

Presión de Contacto del Neumático
(combinación de carga por rueda,
presión de inflado de neumáticos y
características del neumático)



RODILLO NEUMÁTICO

Relaciones de Masa por Unidad de Ancho (m) con PUS y HOC

$GC_{\text{máx}}$ respecto a energía Proctor normal aumenta con aumento de carga por rueda y/o presión de inflado de neumáticos

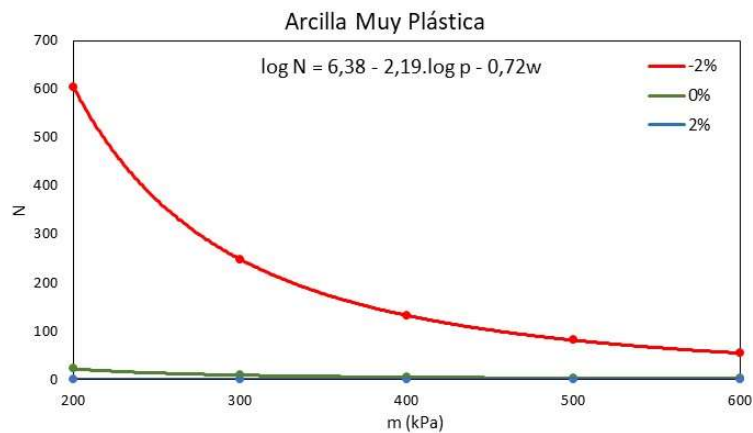
HOC disminuye con aumento de carga por rueda y/o presión de inflado de neumáticos

Influencia de presión de contacto en GC y HOC es mayor en suelos arcillosos que en granulares

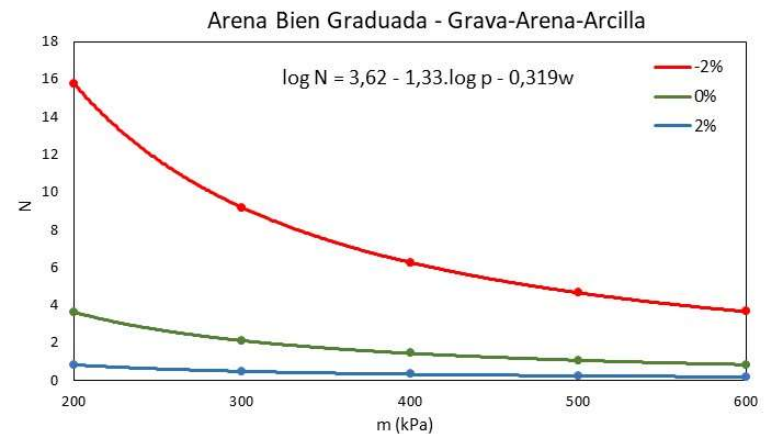
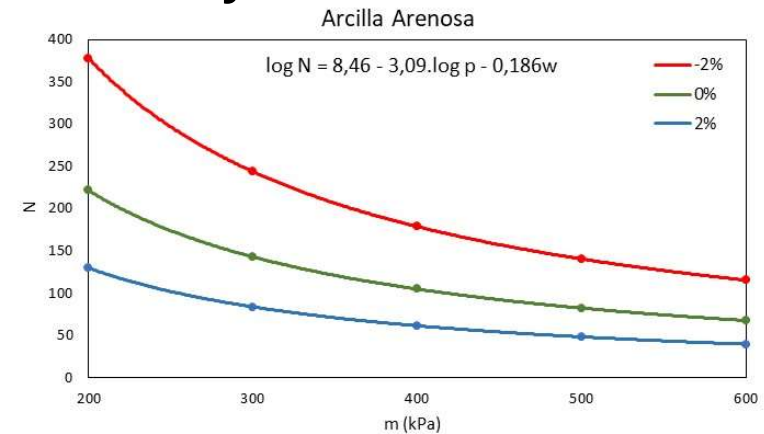


RODILLO NEUMÁTICO

Relación Entre Estado de Compactación y Número de Pasadas

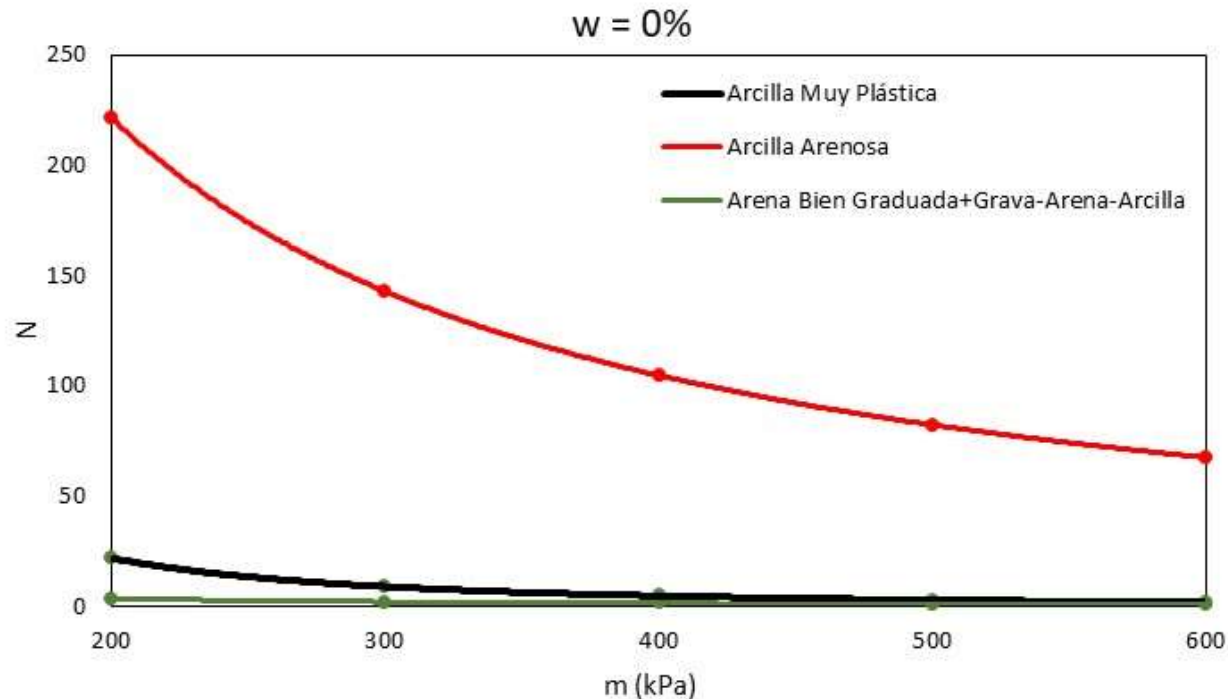


N: Número de pasadas para alcanzar
95% $GC_{Proctor Normal}$
p = Presión de contacto (kPa)



RODILLO NEUMÁTICO

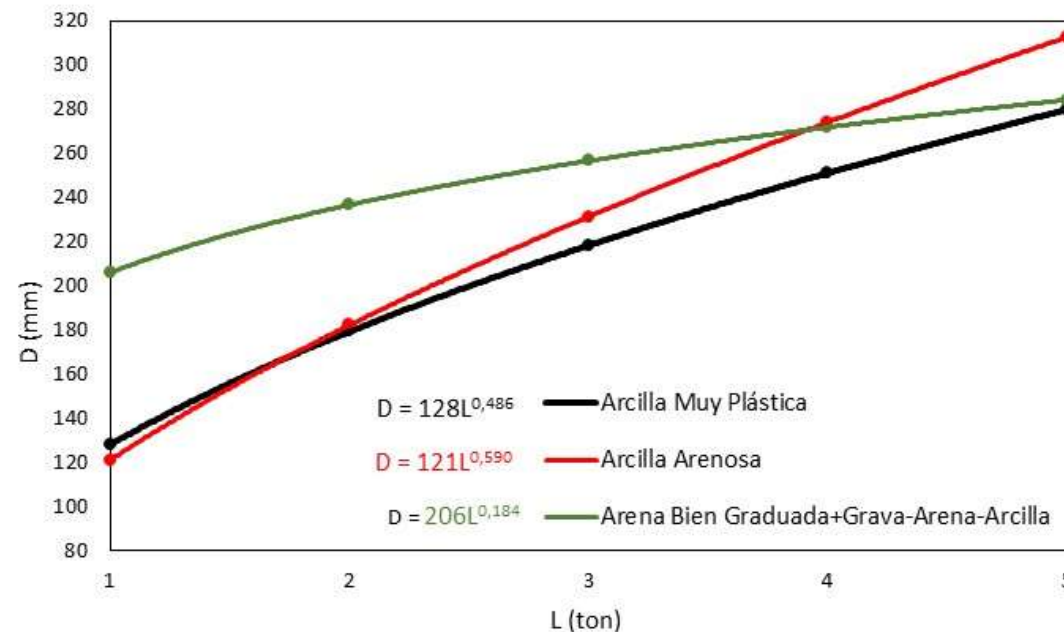
Relación Entre Estado de Compactación y Número de Pasadas



Método de compactación más eficiente para suelos gruesos bien graduados y en menor medida arcillas muy plásticas

RODILLO NEUMÁTICO

Relaciones Entre el Estado de Compactación y la Profundidad Dentro de la Capa Compactada



D: Máxima profundidad de capa para alcanzar 90% $GC_{Proctor Normal}$

L: Carga por rueda

RODILLO PATA DE CABRA

Ideal para 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

Se caracterizan por la masa por unidad de ancho efectivo (m)

$$m = \frac{M}{l}$$

$$l = L \times C$$

$$C = \frac{\sum A_c}{A_T}$$

M: Peso del Rodillo

l: Ancho Efectivo

L: Ancho Total del Rodillo

C: Cobertura

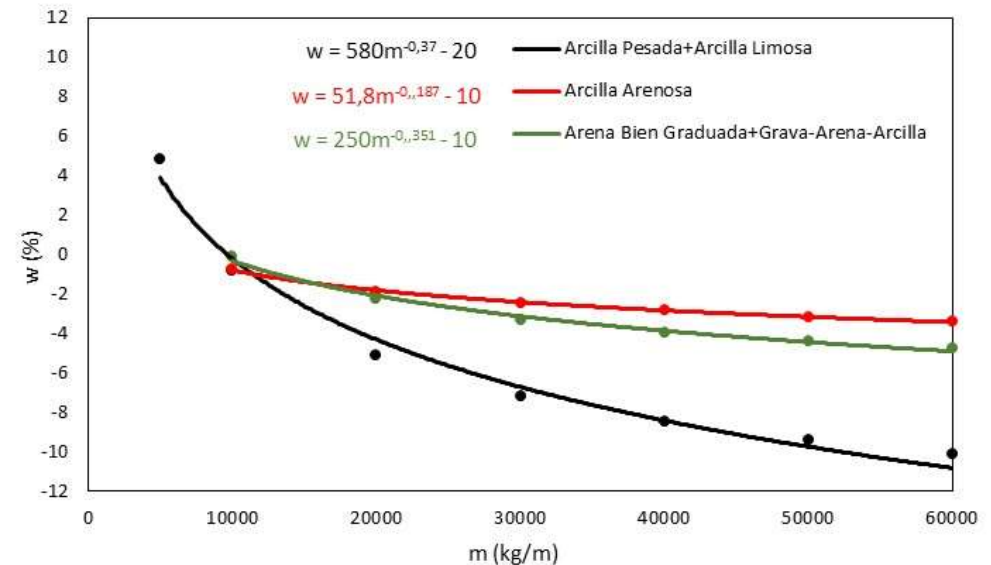
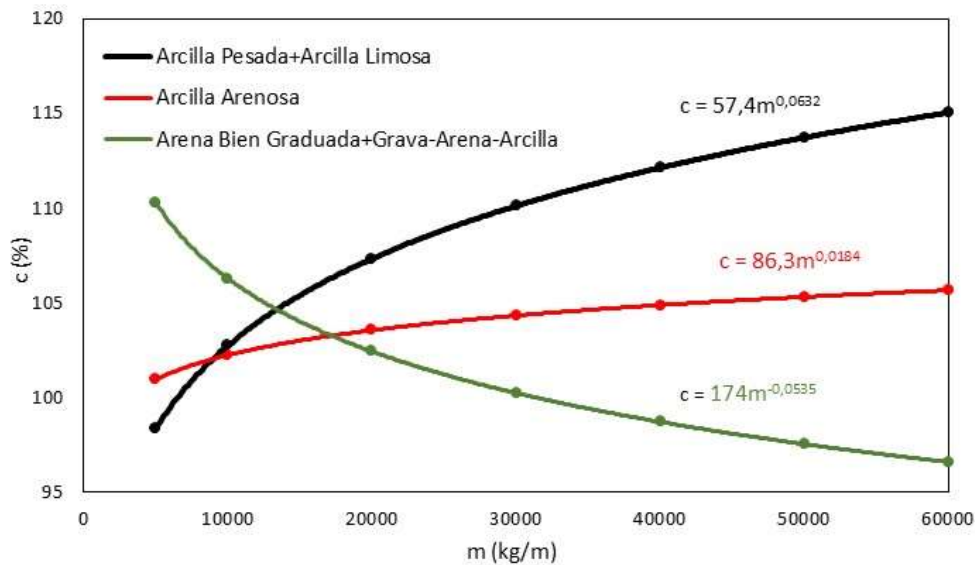
A_c : Área de Contacto de Patas por Hilera

A_T : Área Total del Rodillo



RODILLO PATA DE CABRA

Relaciones de Masa por Unidad de Ancho Efectivo con PUS y HOC



Arena Bien Graduada y Grava-Arena-Arcilla

Aumento de m reduce c

Estos tipos de suelos no deben ser compactados con pata de cabra

RODILLO PATA DE CABRA

Factores Que Influyen en Número de Pasadas (N)

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	$p = 4,56 - 0,918m - 0,403c - 0,0569w$
Arcillas arenosas	$p = 4,71 - 1,01m - 0,647c - 0,0899w$
Arenas bien graduadas y Gravas-Arena-Arcillas	$p = 0,753 - 0,112m - 0,493c - 0,243w$

$p = \log_{10} (N)$ para alcanzar 95% $GC_{\text{Proctor Normal}}$

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

$c = \log_{10}$ de cobertura

RODILLO VIBRATORIO

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

Las fuerzas dinámicas dependen de la masa del equipamiento

INDICADOR DE DESEMPEÑO

Liso

Masa por Unidad de Ancho

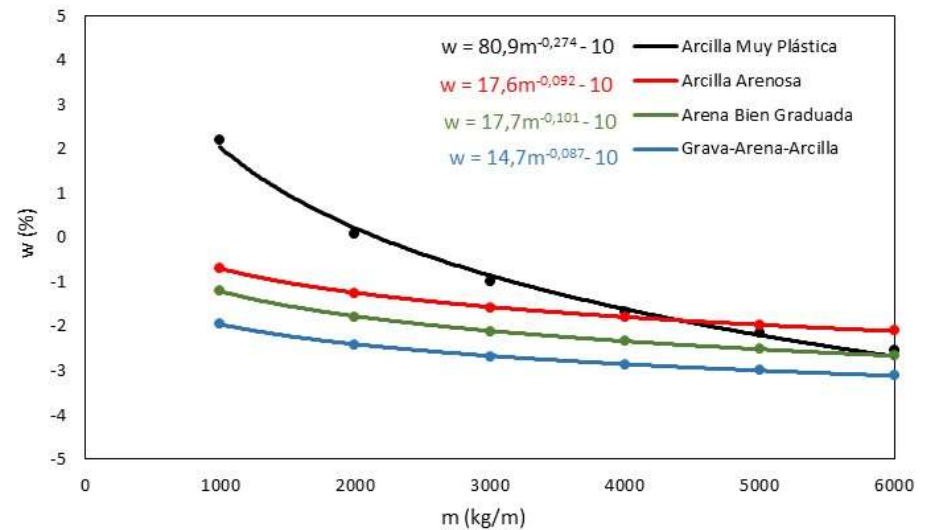
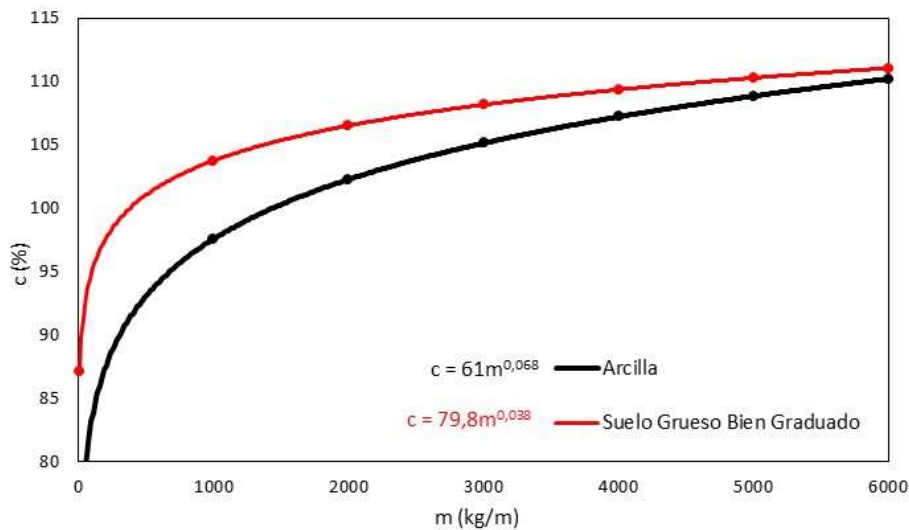
Pata de Cabra

Masa por Unidad de Ancho Efectivo



RODILLO VIBRATORIO LISO

Relaciones de Masa por Unidad de Ancho con PUS y HOC

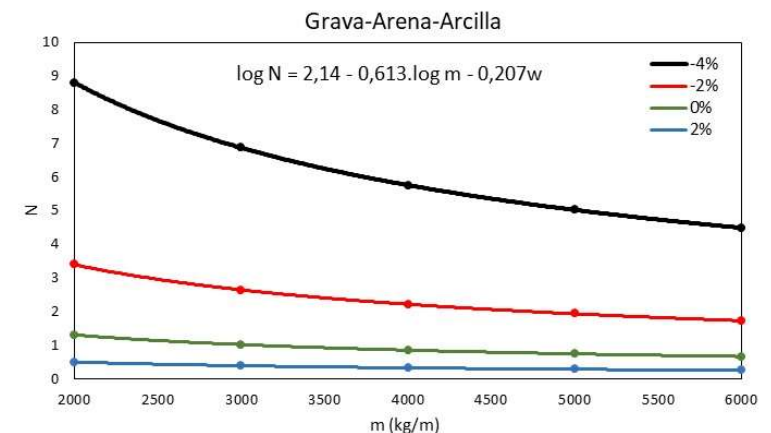
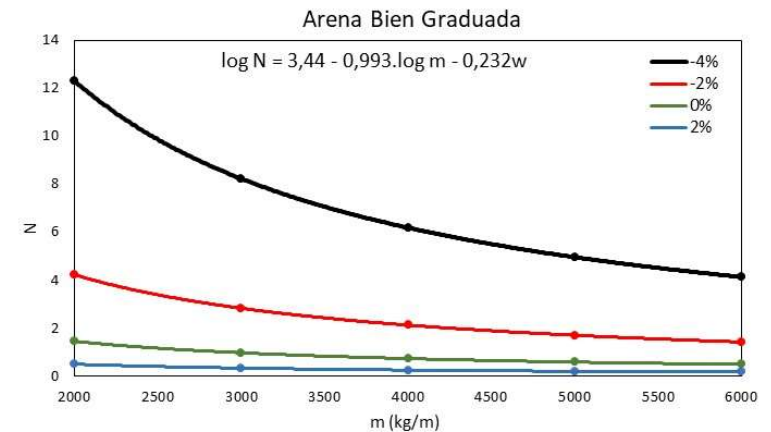
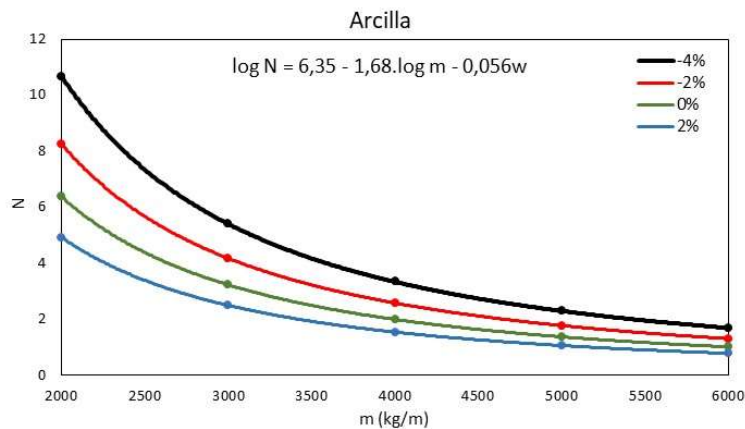


c: GC Máximo respecto a Energía Proctor Normal

w: $HOC_{in-situ} - HOC_{Proctor\ normal}$

RODILLO VIBRATORIO LISO

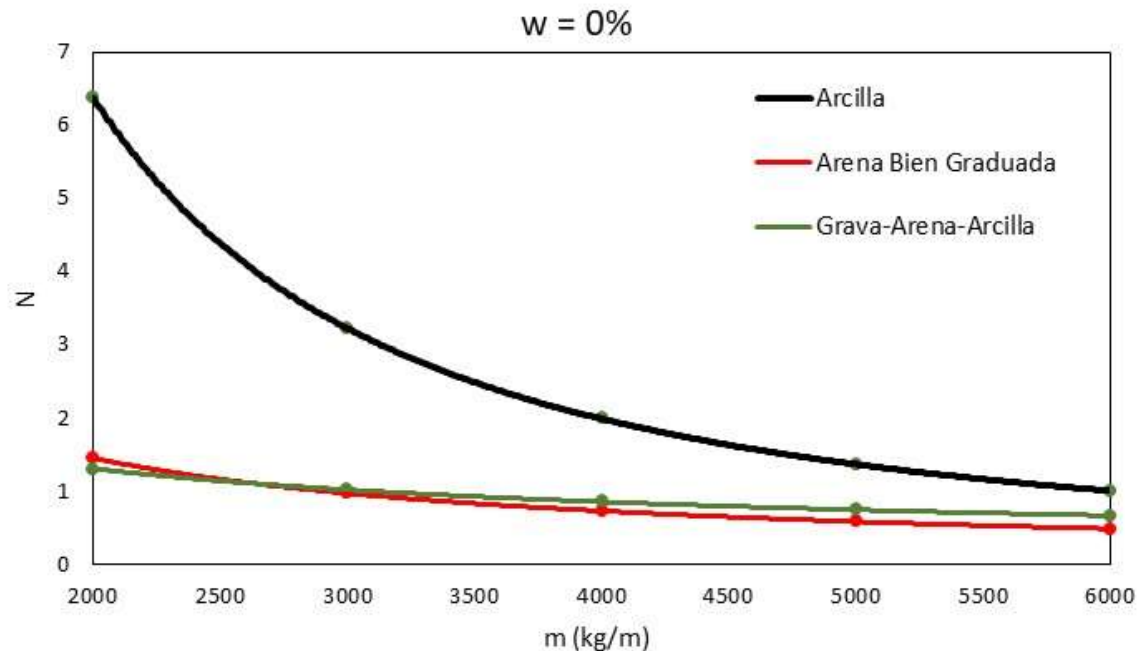
Regresiones Entre Estado de Compactación y Número de Pasadas



N: Número de pasadas para alcanzar
 95% $G_{C_{Proctor Normal}}$
 m: Masa por unidad de ancho

RODILLO VIBRATORIO LISO

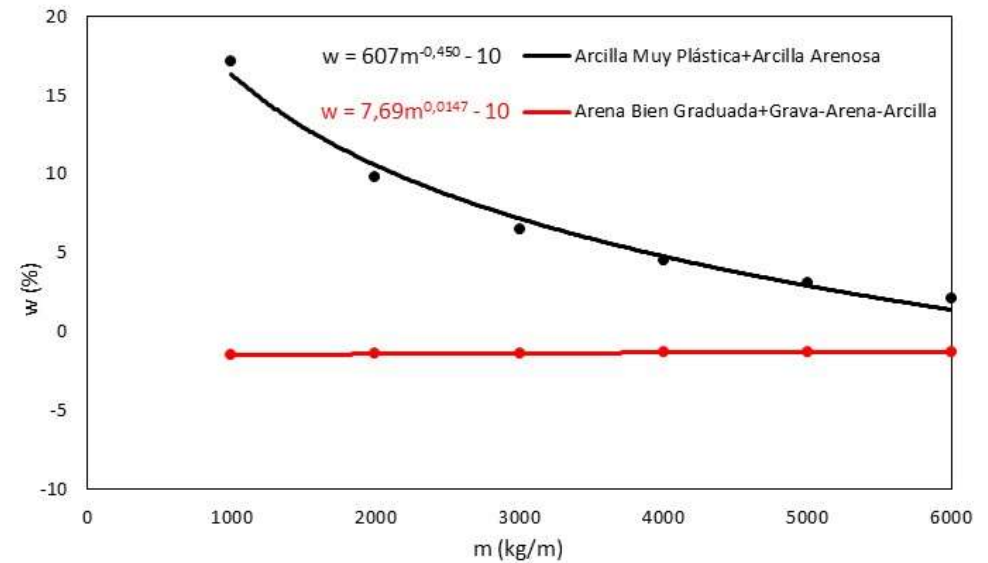
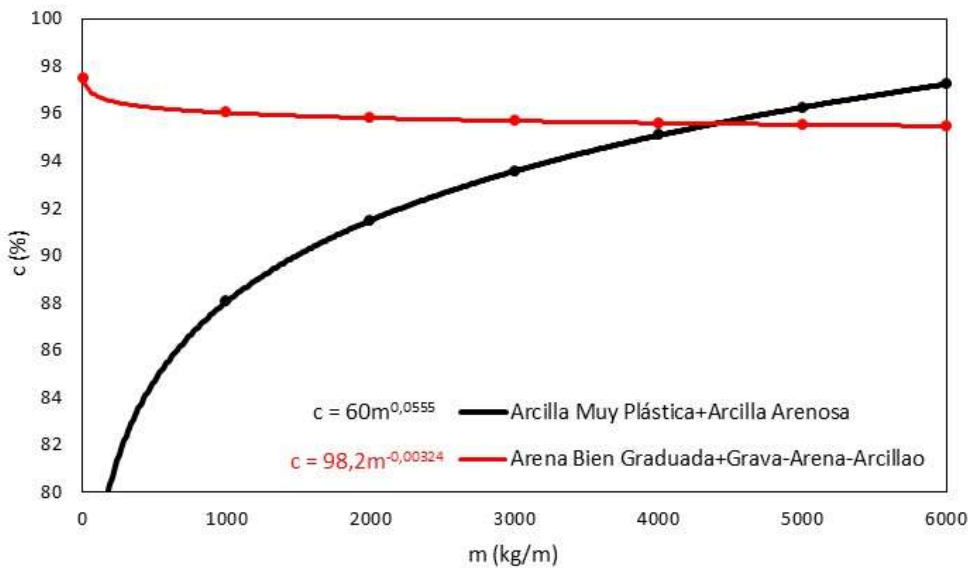
Regresiones Entre Estado de Compactación y Número de Pasadas



Método de compactación más eficiente para arenas bien graduadas y suelos gruesos con arcilla

RODILLO VIBRATORIO PATA DE CABRA

Relaciones de Masa por Unidad de Ancho Efectivo con PUS y HOC

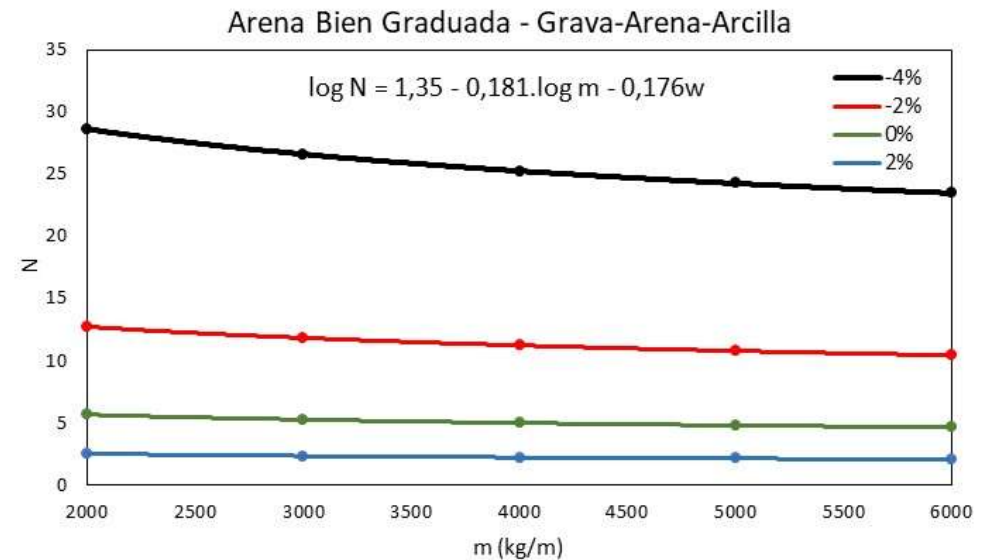
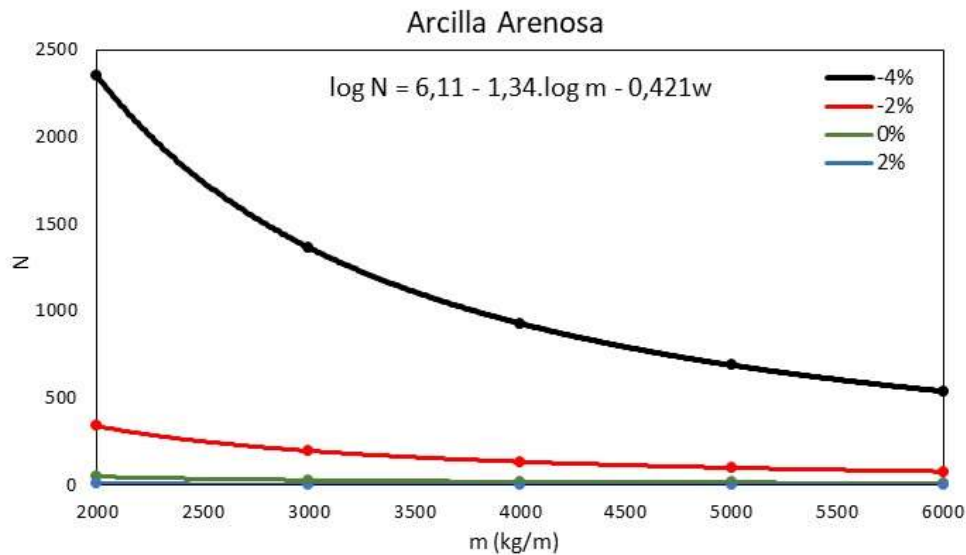


c : GC Máximo respecto a Energía Proctor Normal

w : $HOC_{in-situ} - HOC_{Proctor normal}$

RODILLO VIBRATORIO PATA DE CABRA

Regresiones Entre Estado de Compactación y Número de Pasadas

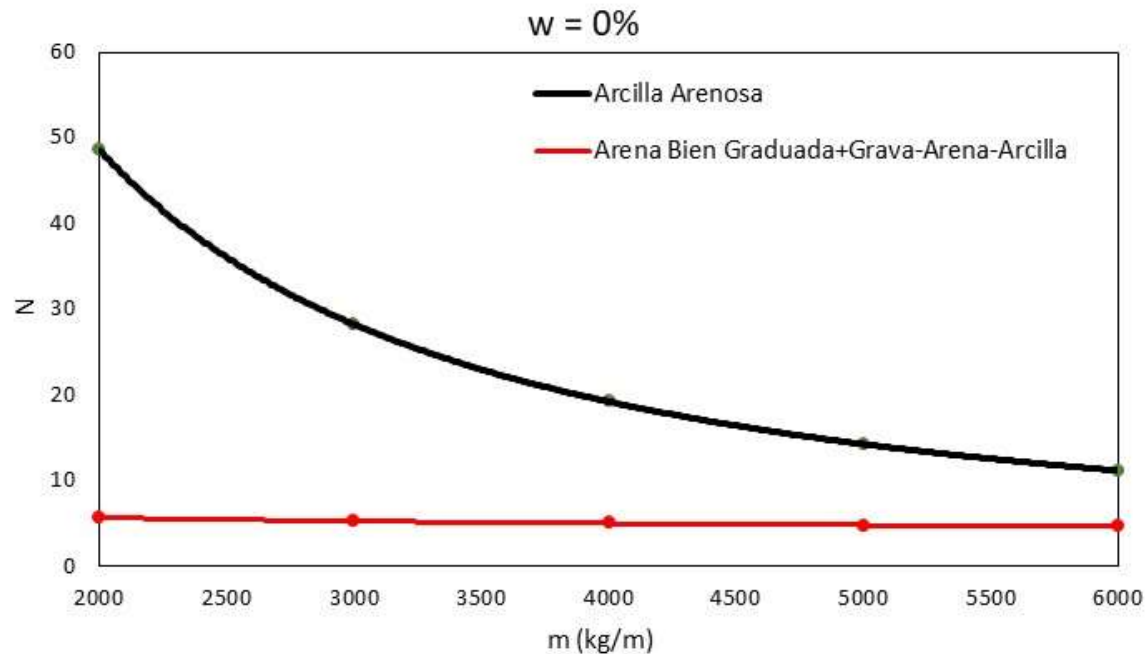


N: Número de pasadas para alcanzar 95% $GC_{Proctor Normal}$

m: Masa por unidad de ancho efectivo

RODILLO VIBRATORIO PATA DE CABRA

Regresiones Entre Estado de Compactación y Número de Pasadas



Método de compactación más eficiente para arenas bien graduadas y suelos gruesos con arcilla