

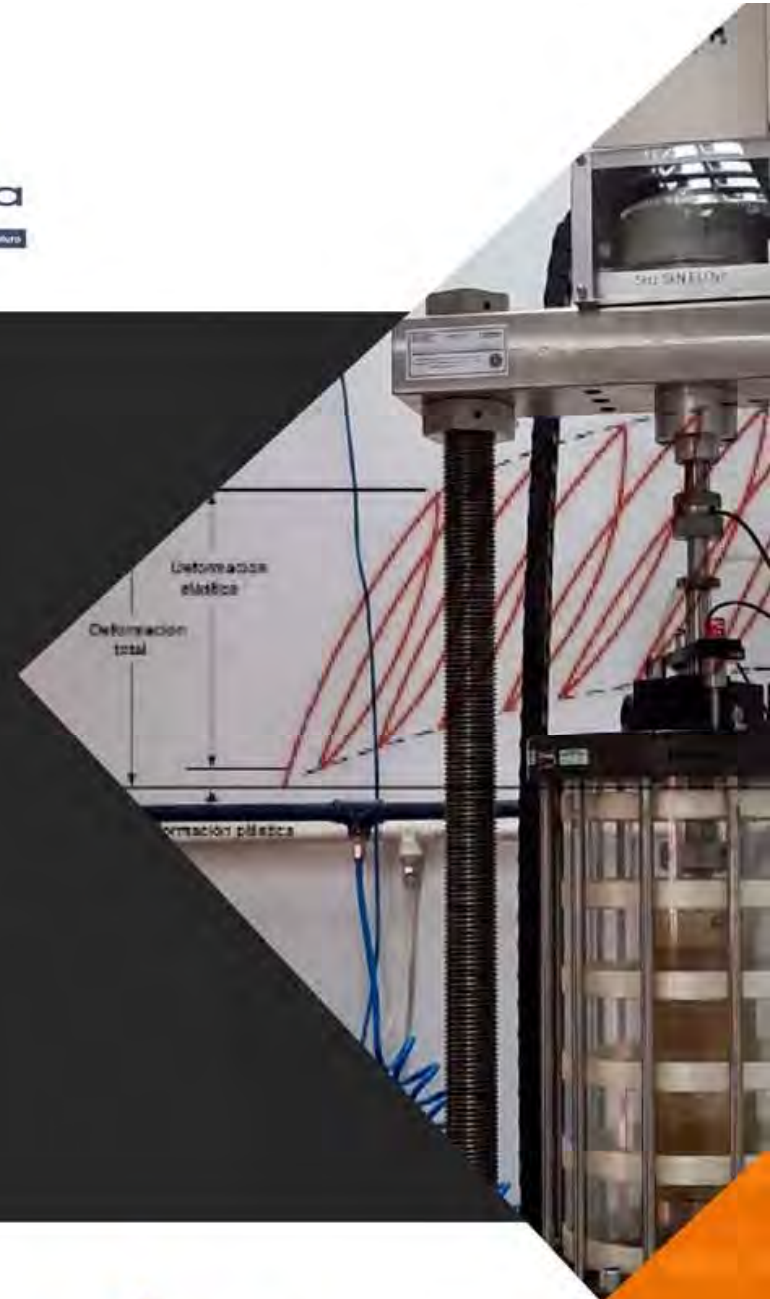


SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL

MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

DISERTANTE:

Dra. Ing. Silvia Maria Angelone - Argentina



APOYAN:



TETÁ REMBIAPO
HA MARANDU
Mitsosondcha
Ministerio
OBRAS PÚBLICAS
Y COMUNICACIONES



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE ASUNCIÓN
FACULTAD DE
INGENIERÍA



COMISIÓN PERMANENTE
DEL ASFALTO

CARRETERAS
Y ALGO MÁS



CAMARA
PARAGUAYA DE
CONSULTORES

Módulo Resiliente de Suelos y Materiales No Ligados



Prof. Dra. Inga. Silvia Angelone

Laboratorio Vial

Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE)

Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Universidad Nacional de Rosario. Argentina



Índice

1

- Introducción

2

- Comportamiento resiliente de suelos y materiales granulares no ligados

3

- Ensayo triaxial dinámico
- Preparación y confección de probetas
- Estudio experimental



Introducción

ACTUALMENTE

Sostenibilidad o Sustentabilidad en Carreteras

Buscar:

- Soluciones Inteligentes para tender a una Infraestructura del Transporte Sustentable
- Introducir la Sustentabilidad para cambiar la visión de la Infraestructura del Transporte
- Un enfoque más multidisciplinario para introducir nuevas tecnologías

Introducción

ACTUALMENTE

Sostenibilidad o Sustentabilidad en Carreteras

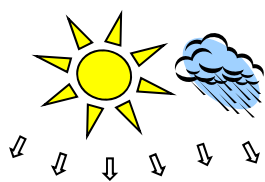
En Infraestructura del Transporte

- DISEÑO PARA DURAR** (poco mantenimiento, que se autorreparen, que generen energía, que se adapten)
- MAXIMIZAR EL RECICLADO** (nuevos materiales, que las rutas duren, se comporten mejor)
- MINIMIZAR LOS IMPACTOS** (ambientales, sociales, económicos, sobrecostos)

NUEVOS MATERIALES

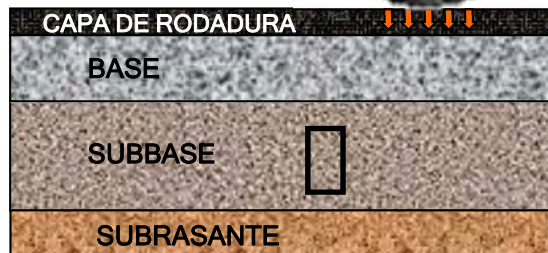
NECESIDAD DE
CARACTERIZARLOS

Modelización del Comportamiento

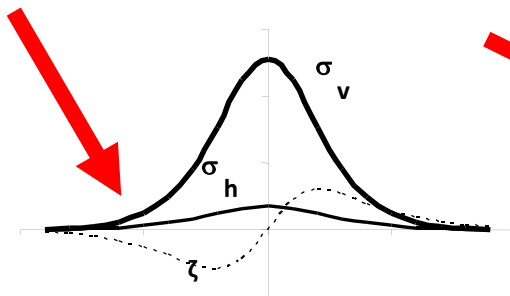


Solicitaciones:
Tránsito y clima

- Experiencia
- Tramos en servicio
- Pistas de ensayo
- Ensayos de Laboratorio
- Retrocálculo, deflexiones in situ



Caracterización de
materiales

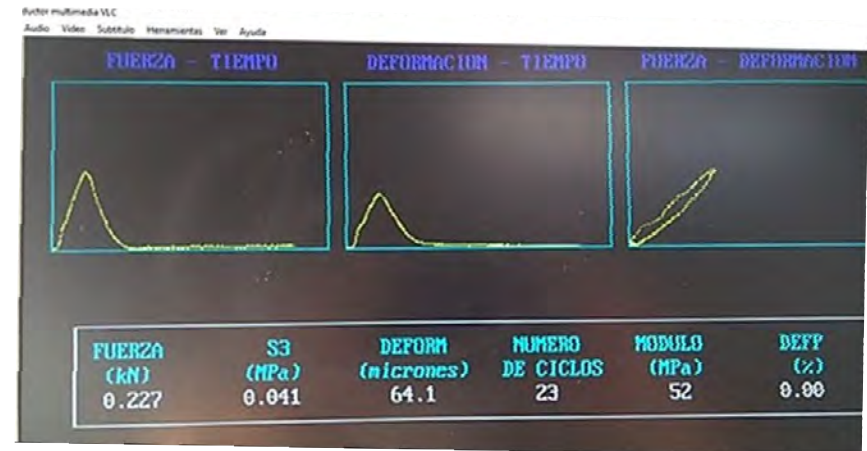
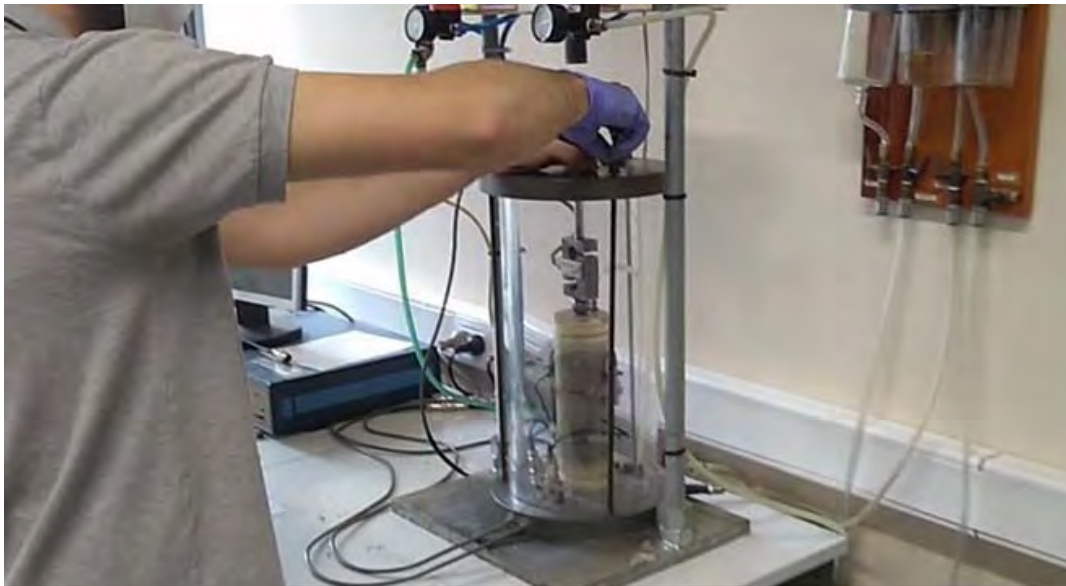


TENSIONES Y
DEFORMACIONES
(dinámicas)

Diseño Estructural
Mecánico

<https://www.fceia.unr.edu.ar/laboratoriovial/descarga.php>

Comportamiento resiliente de suelos y materiales granulares. Módulo Resiliente (Mr)



Comportamiento resiliente de suelos y materiales granulares

Comportamiento
Elástico Lineal

No describe el real
comportamiento en la
estructura del
pavimento

Comportamiento
Elástico NO Lineal

Tiene en cuenta el
estado de tensiones en
la estructura del
pavimento

Comportamiento resiliente de suelos y materiales granulares

Comportamiento
Elástico Lineal



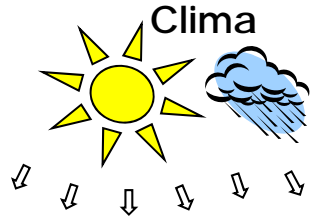
Mr empírico
Correlaciones con CBR,
DN, LL
Valor único
Mr = 10 CBR

Comportamiento
Elástico NO Lineal

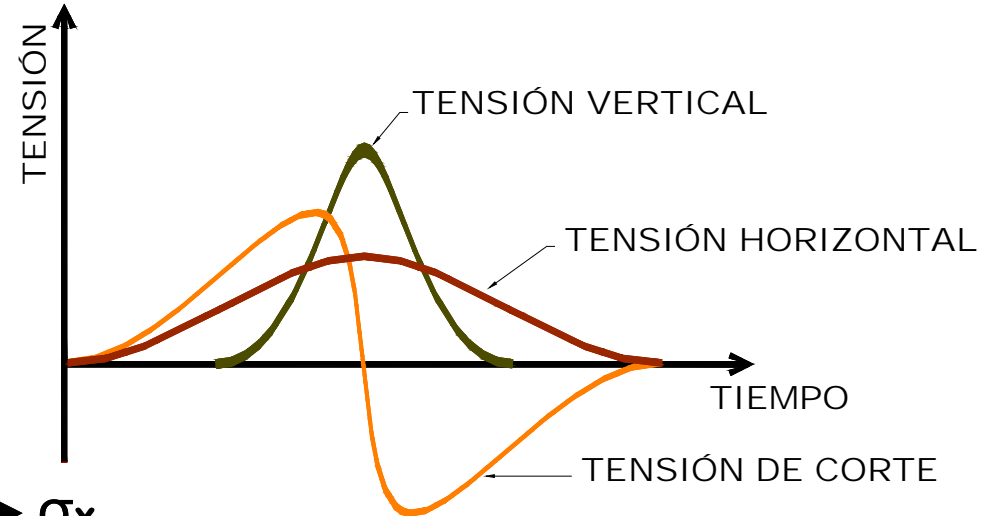
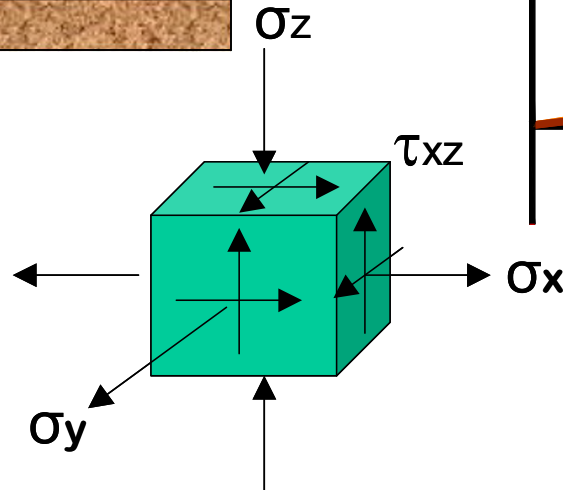
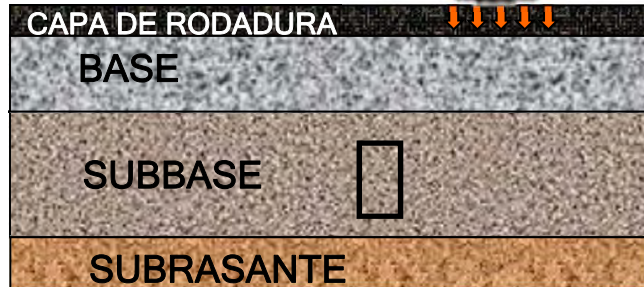
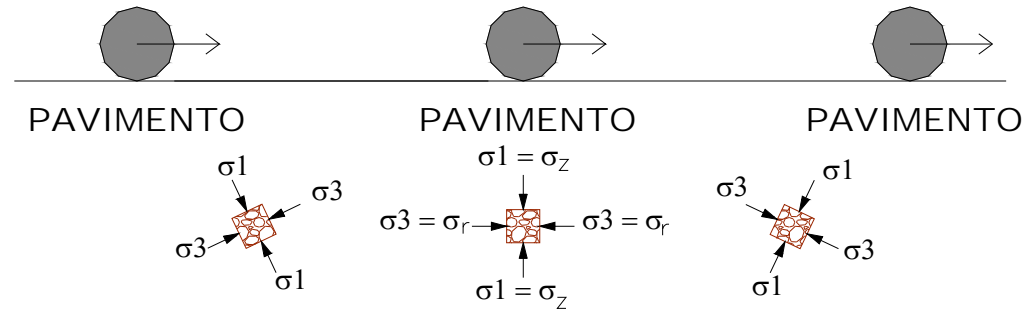
Mr = f (σ)
Ecuaciones Constitutivas
En función de las Tensiones

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Esquema de distribución de tensiones



Tránsito



Ecuaciones Constitutivas

Tensiones vs. Deformaciones

Es un modelo matemático que puede permitir reproducir la respuesta observada de un medio continuo

$$Mr = f(\sigma, \Delta\sigma, \varepsilon, \Delta\varepsilon, t, T, p)$$

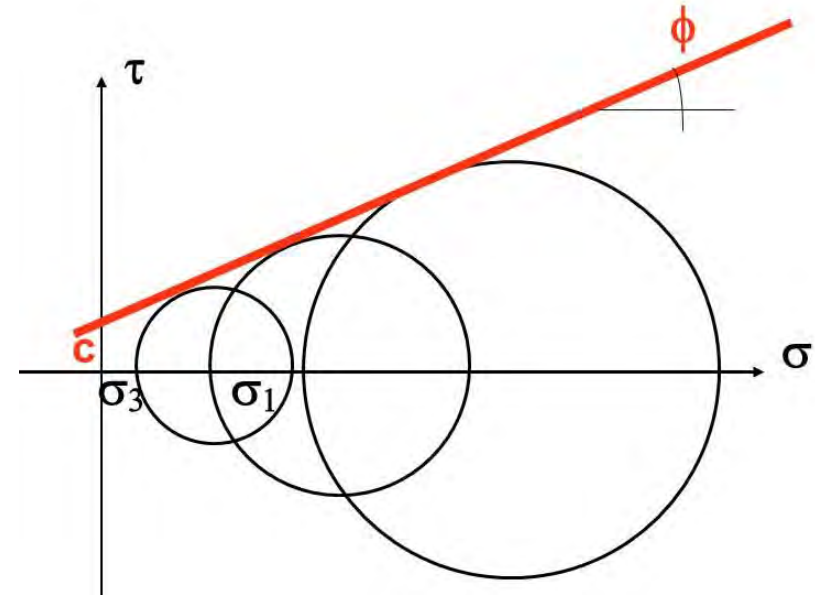
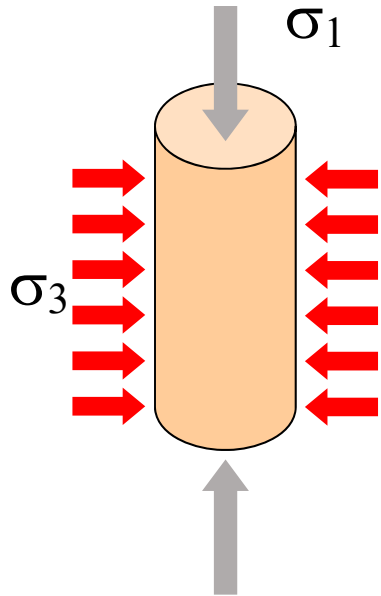
Simple como la ley de Hooke

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

ó más compleja como

$$\frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} = \left[404 + 42PI + 52\gamma_d - 987 \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}} \right) \right] P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{\left(0.25 - 0.03PI + 0.56 \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}} \right) \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \right) \right)} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{\left(-0.21 + 0.23PI + 0.003\gamma_d - 5.42 \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}} \right) \right)}$$

Resistencia al corte de los suelos



σ_1 : tensión ppal mayor

σ_3 : tensión ppal menor

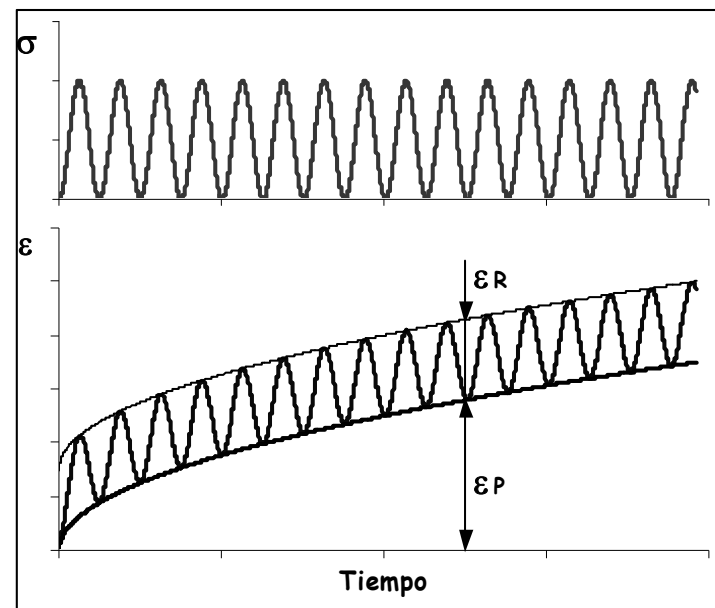
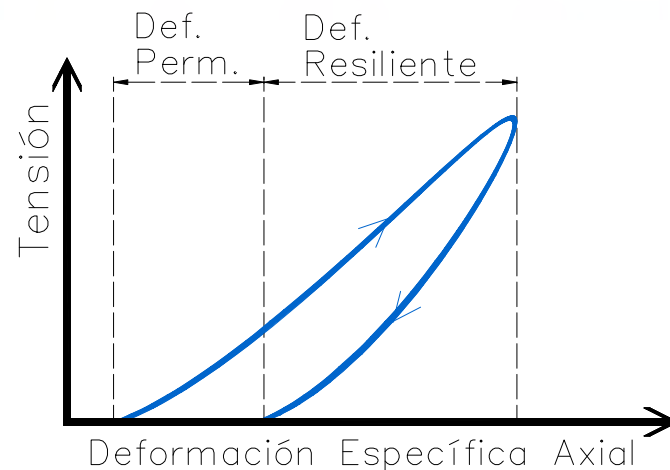
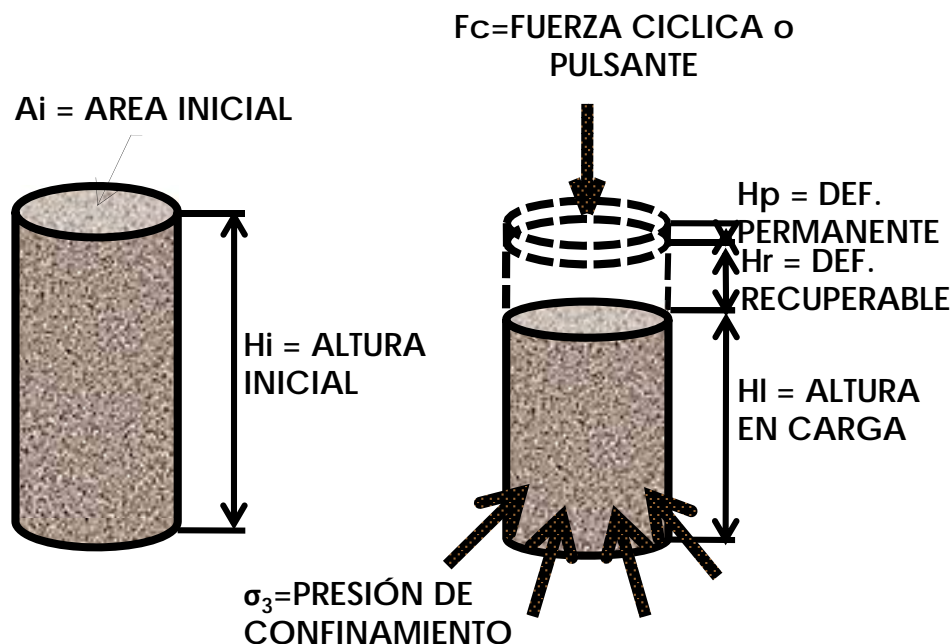
τ : esfuerzo de corte

σ : esfuerzo normal

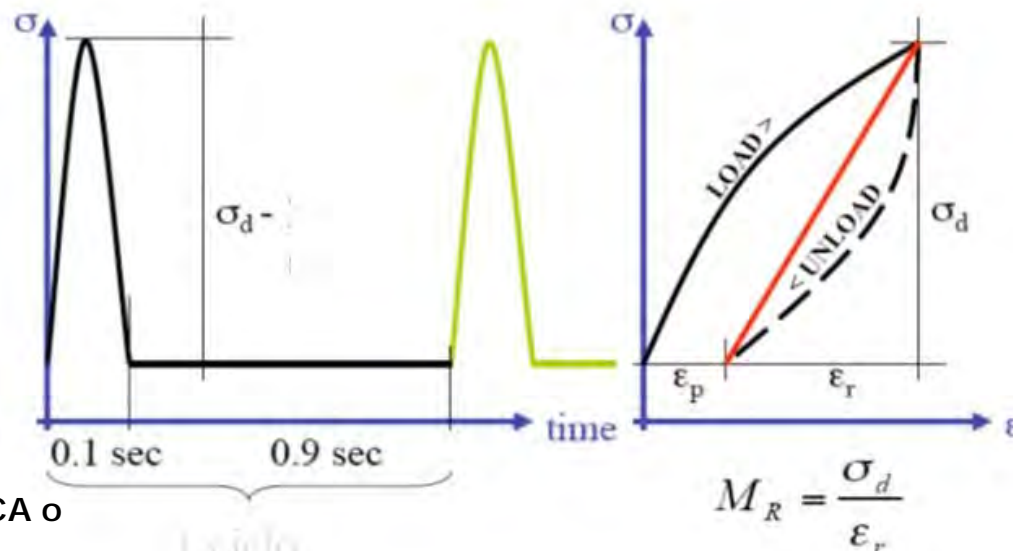
c : cohesión, ϕ : ángulo de fricción interna

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

Comportamiento Resiliente



Módulo Resiliente



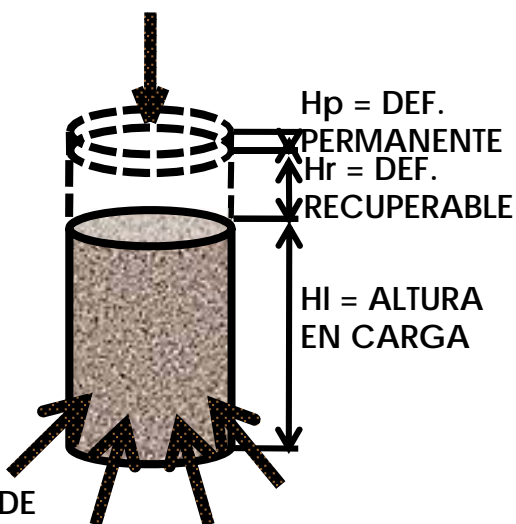
F_c = FUERZA CICLICA o PULSANTE

A_i = AREA INICIAL



H_i = ALTURA INICIAL

σ_3 = PRESIÓN DE CONFINAMIENTO



$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

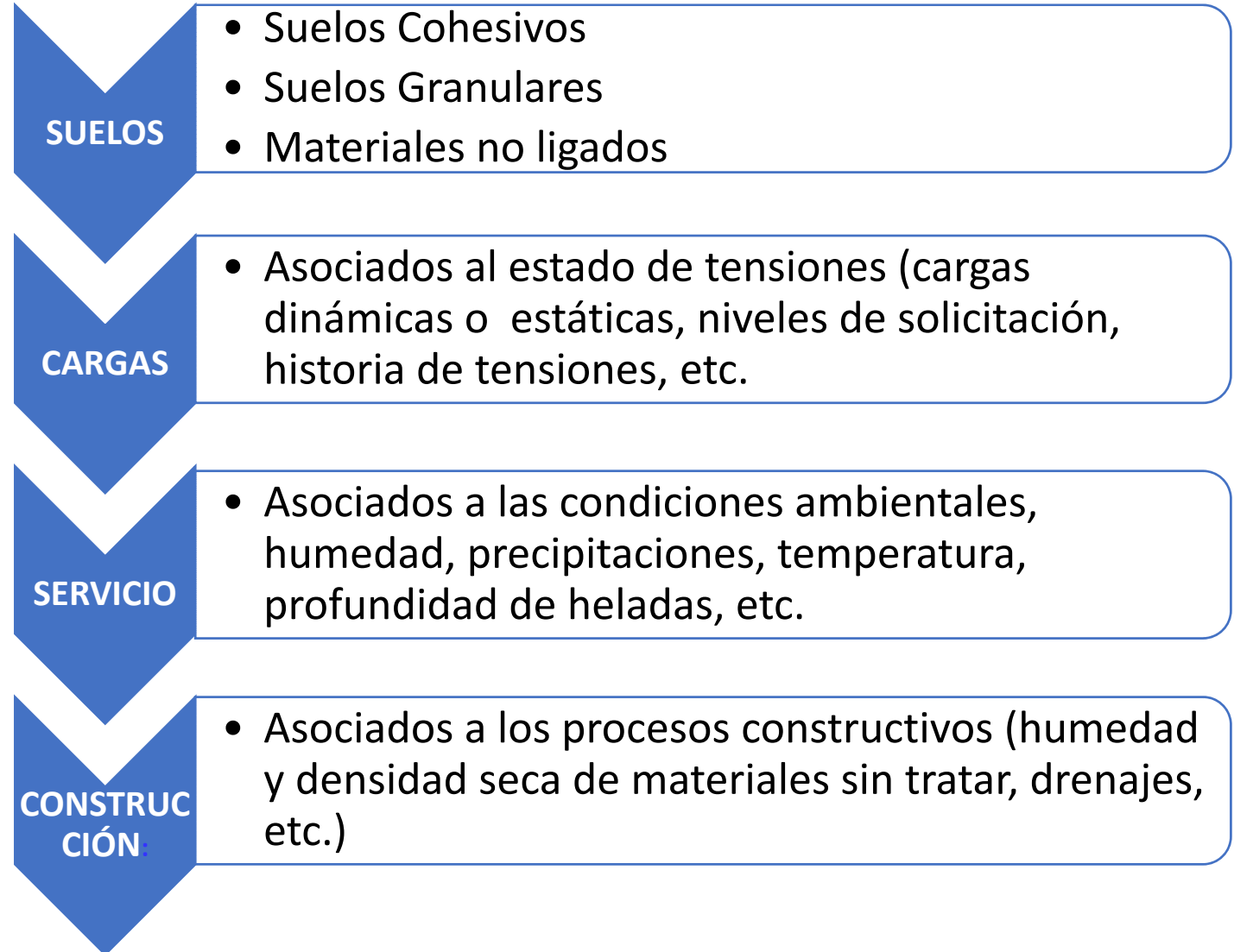
$$\sigma_d = \frac{F_c}{A_i}$$

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

$$\epsilon_r = \frac{H_r}{H_i}$$

Comportamiento Resiliente

Factores de Influencia

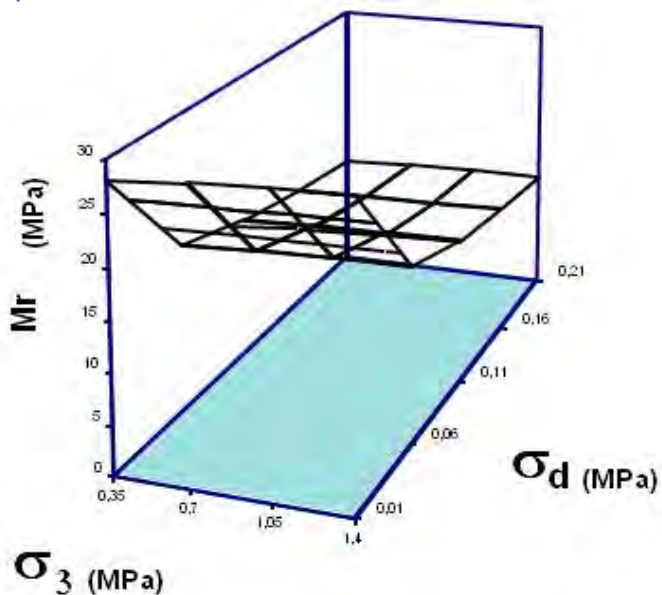


SUELOS

• Suelos Cohesivos

CARGAS

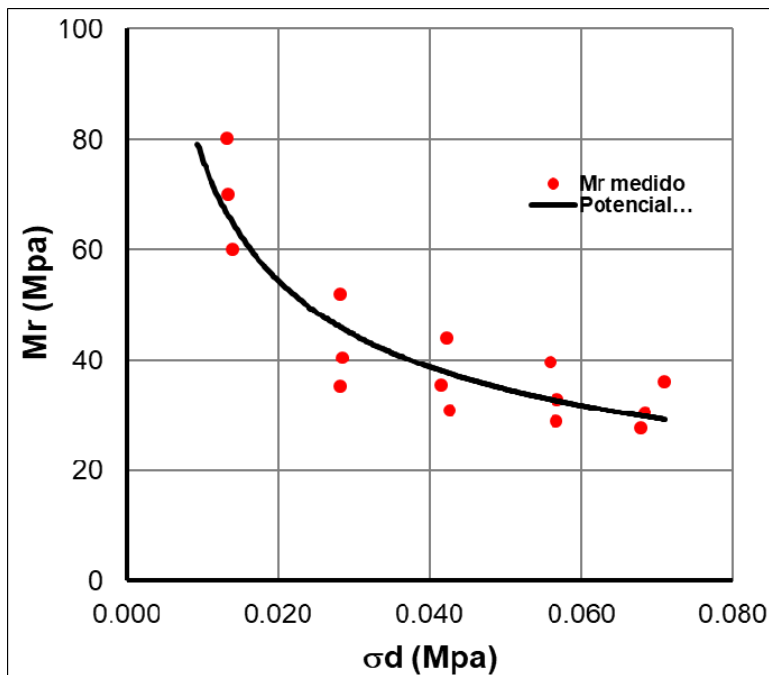
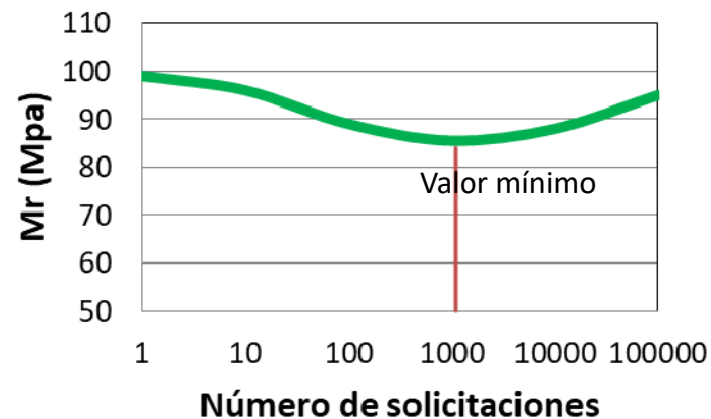
- Tipo de sollicitación: estática o dinámica
- Nº de sollicitaciones aplicadas
- Nivel de tensiones



$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_d$$

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

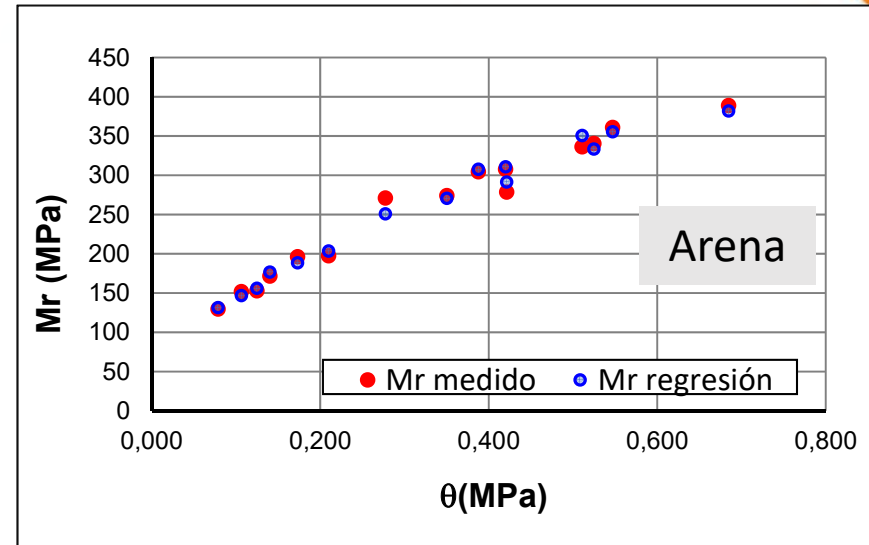


SUELOS

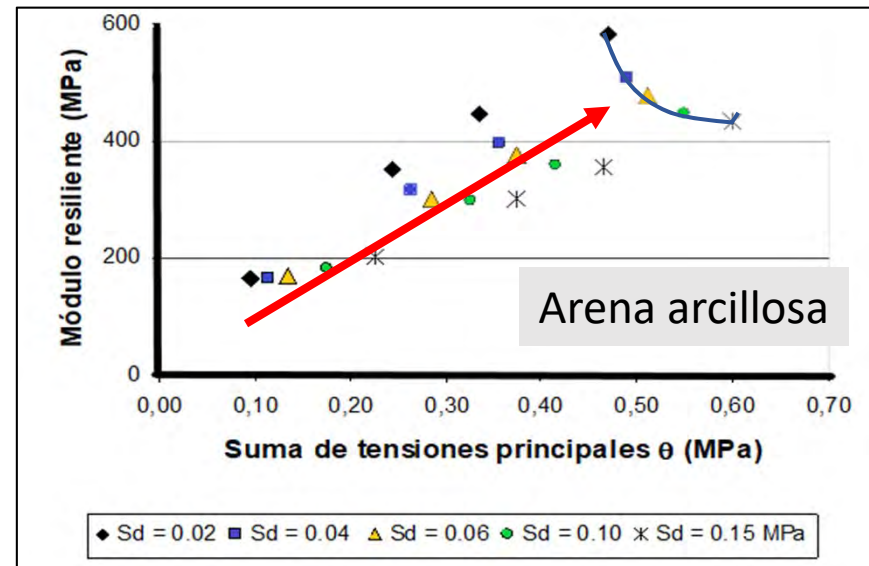
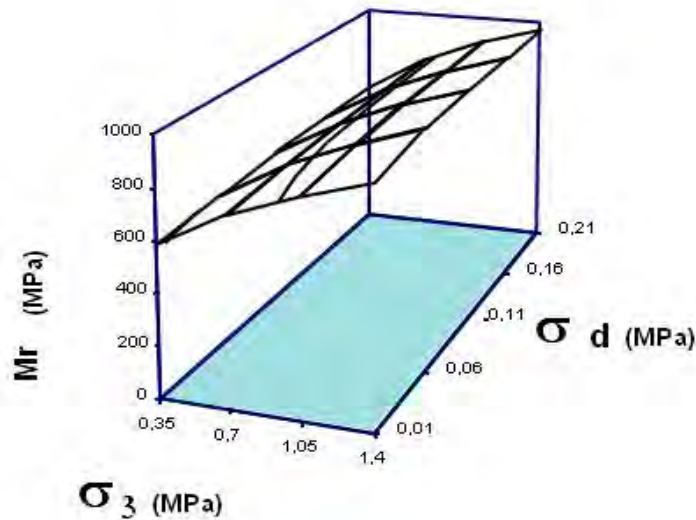
• Suelos Granulares

CARGAS

- Tipo de sollicitación: estática o dinámica
- Nº de sollicitaciones aplicadas
- Nivel de tensiones
- Duración, frecuencia y secuencia



$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$$

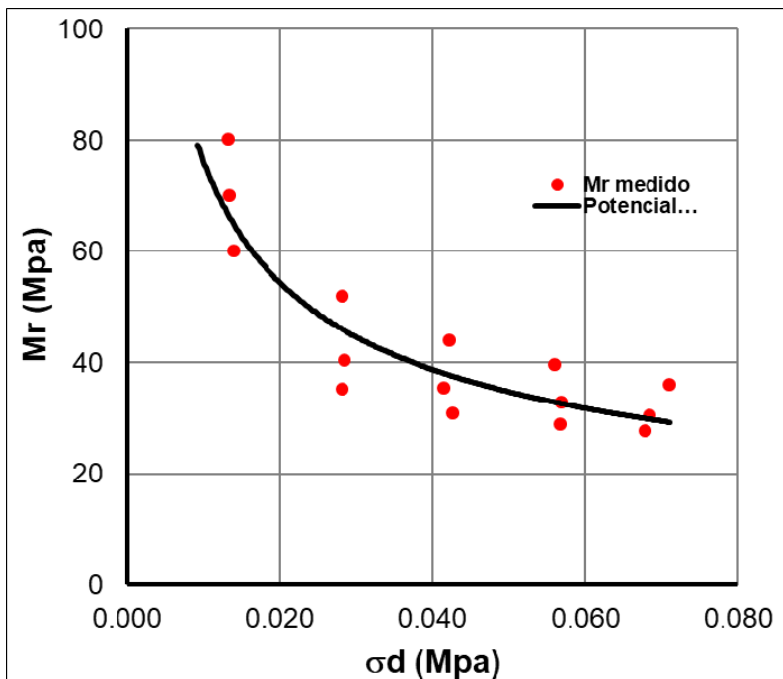


SUELOS

• Suelos Cohesivos

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

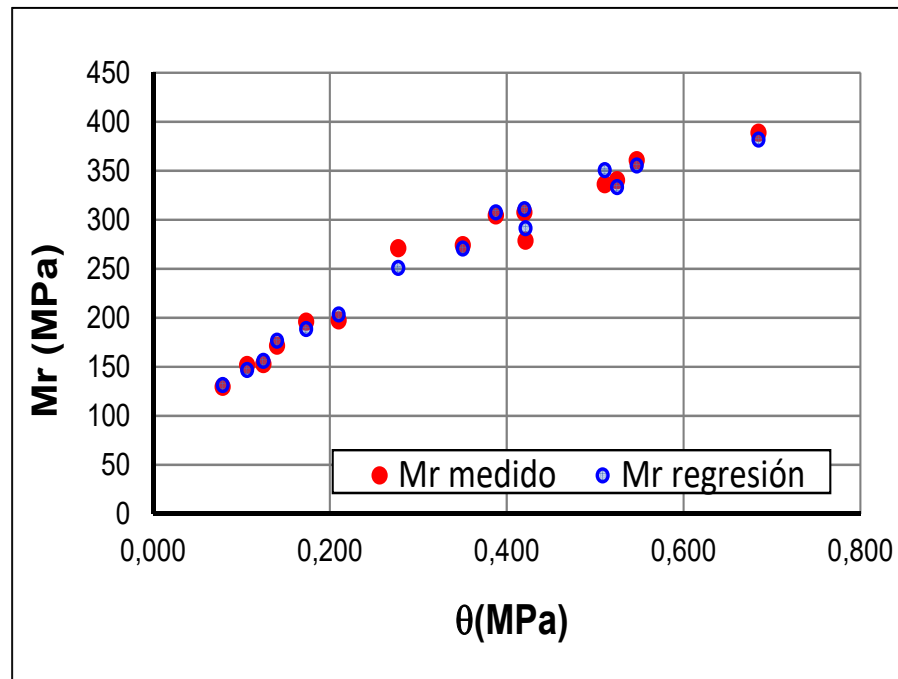
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_d$$



SUELOS

• Suelos Granulares

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$$



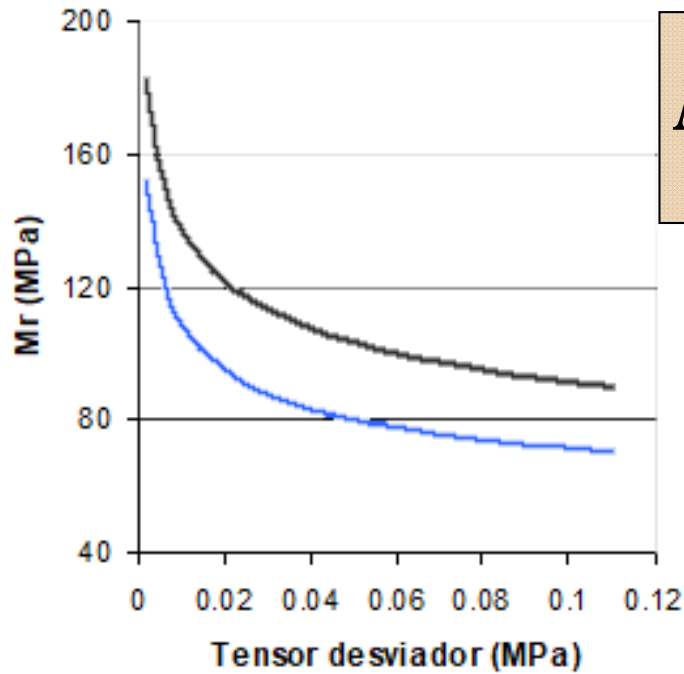
SUELOS

- Suelos Cohesivos

SERVICIO

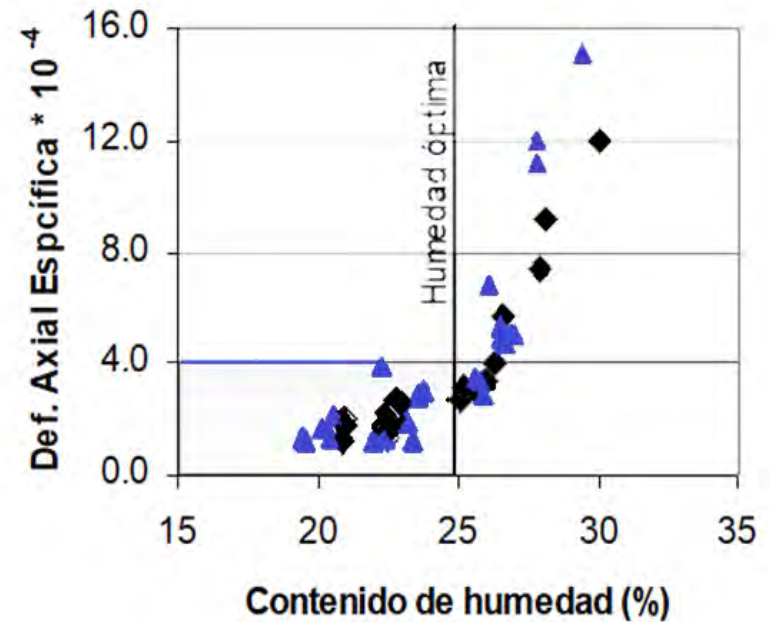
- Método de compactación.
Disposición de las partículas

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_d}{M_R}$$



$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

— Estática — Kneading



◆ Estática ▲ Kneading

SUELOS

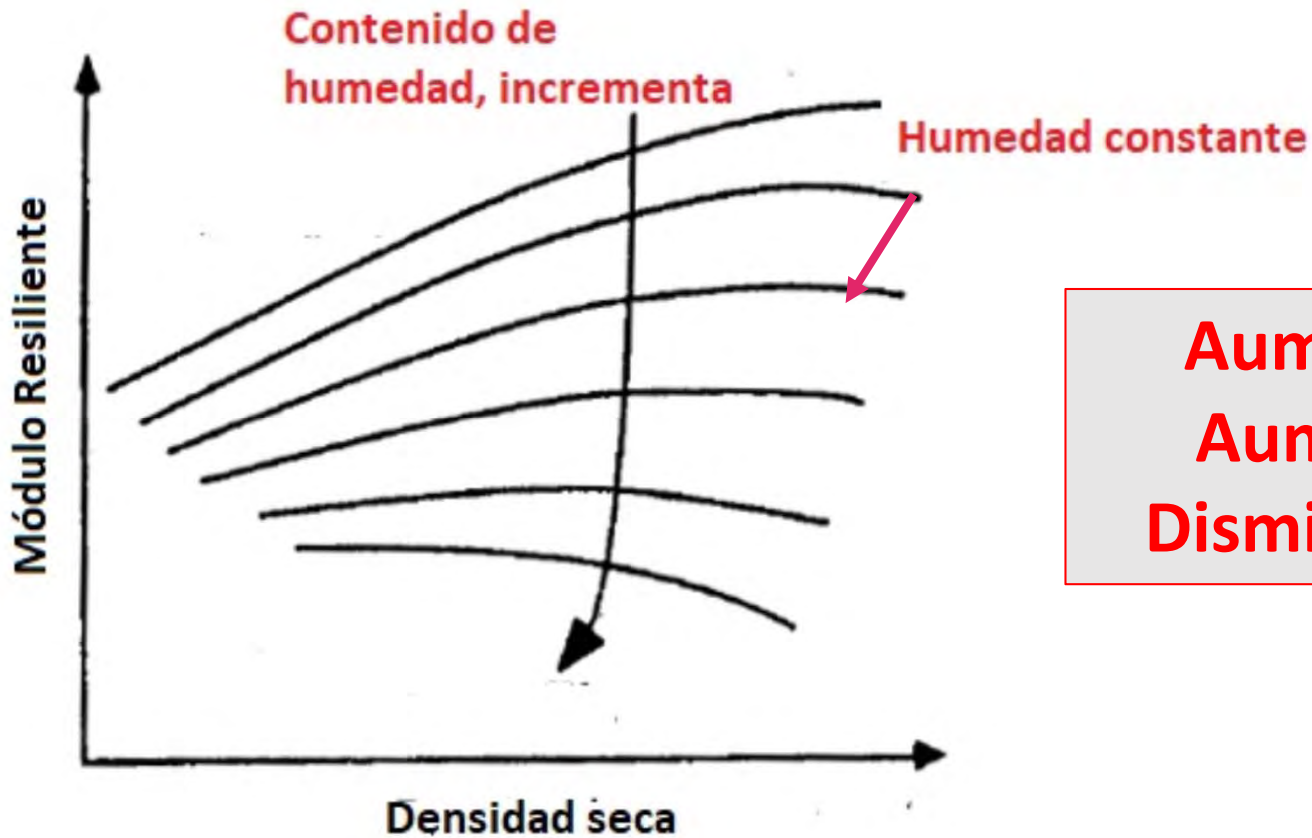
- Suelos Cohesivos

SERVICIO

- Humedad y Densidad Seca

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_d}{M_R}$$

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$



Aumenta w
Aumenta ϵ
Disminuye M_r

SUELOS

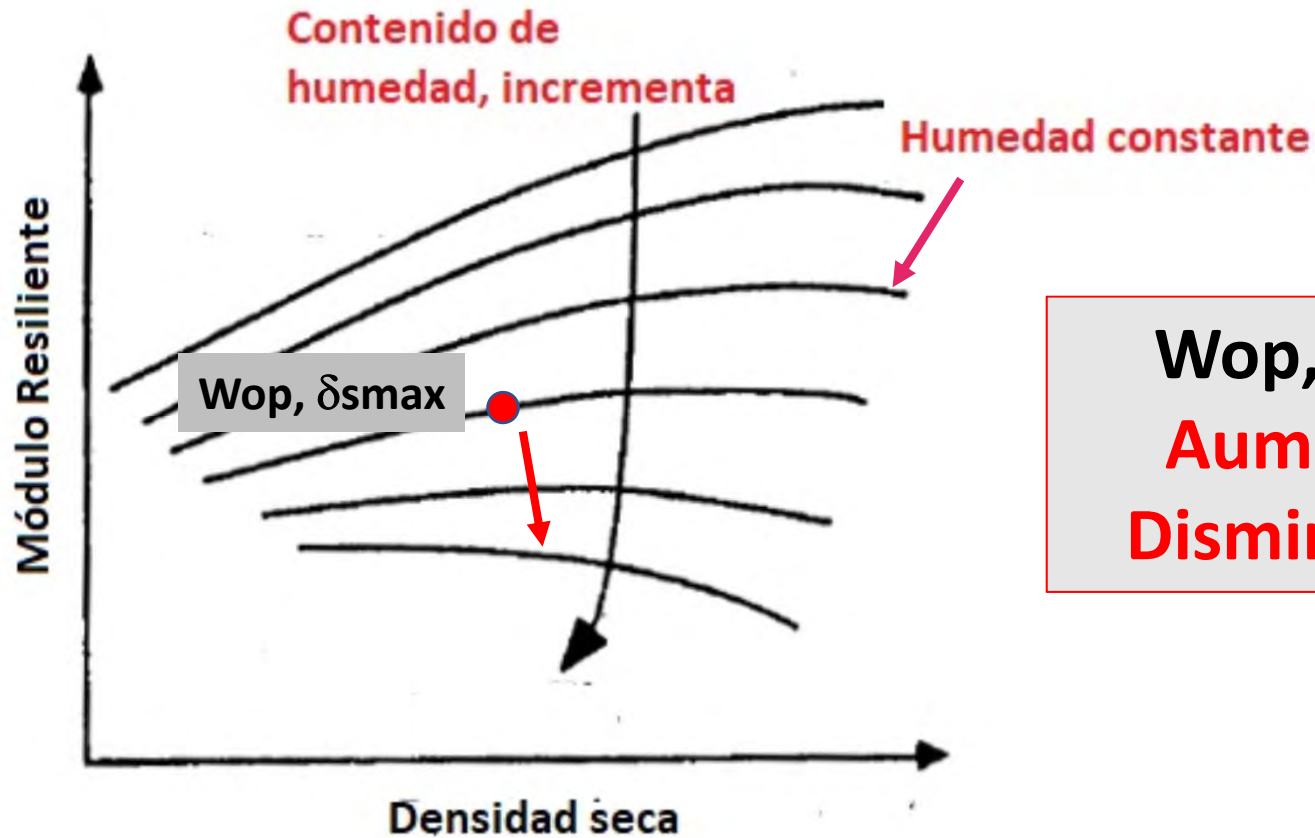
- Suelos Cohesivos

SERVICIO

- Humedad y Densidad Seca

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_d}{M_R}$$

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$



Wop, δ_{smax}
Aumenta w
Disminuye Mr

SUELOS

SERVICIO

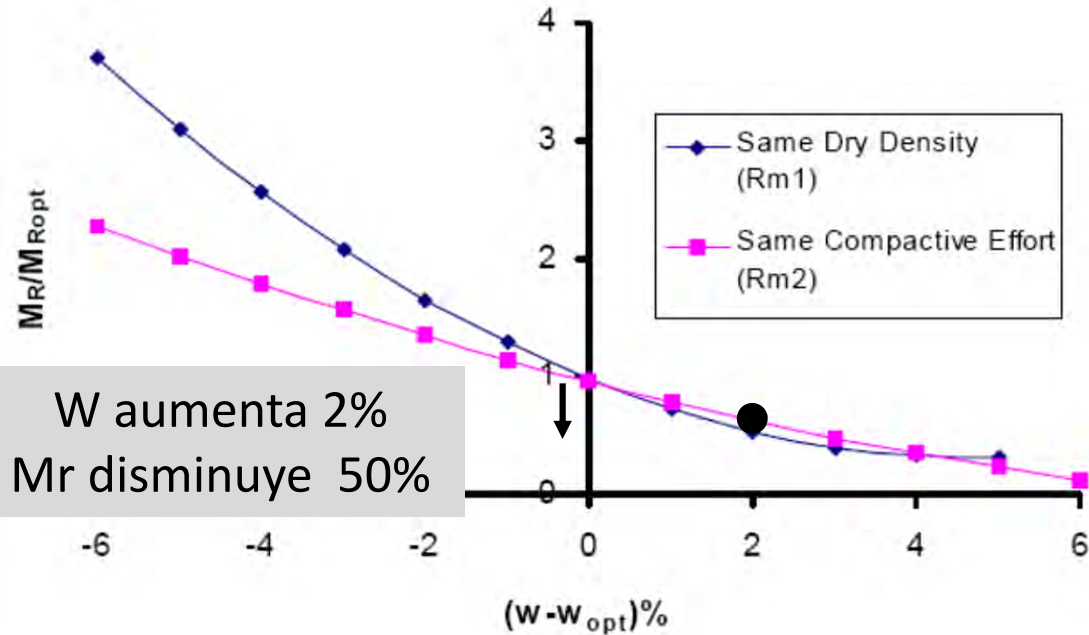
- Suelos Cohesivos

- Humedad y Densidad Seca

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{rec}}$$

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_d}{M_R}$$

Li & Selig (Fine-grained Subgrades)



W aumenta 2%
Mr disminuye 50%

SUELOS

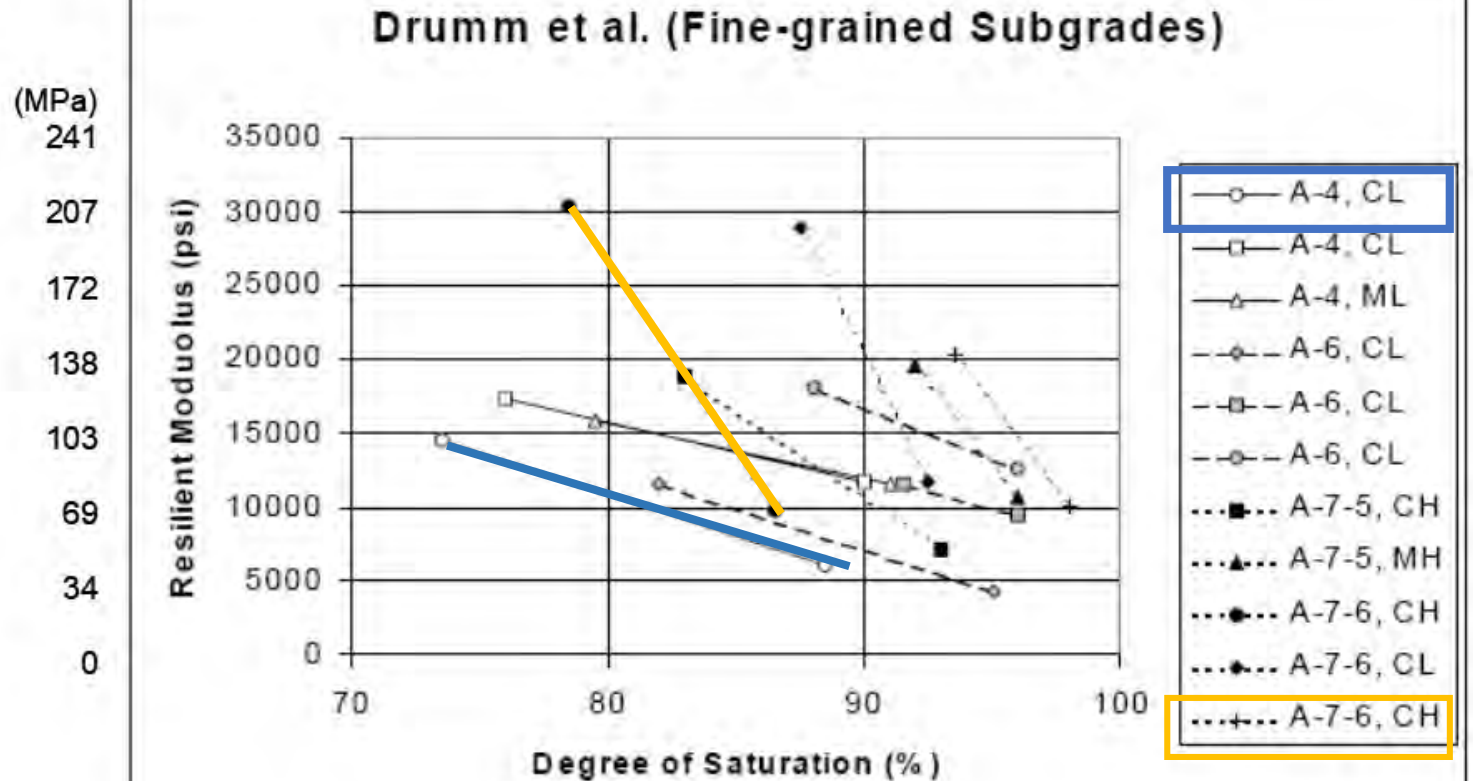
SERVICIO

- Suelos Cohesivos

- Humedad y Grado de Saturación

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{rec}}$$

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_d}{M_R}$$

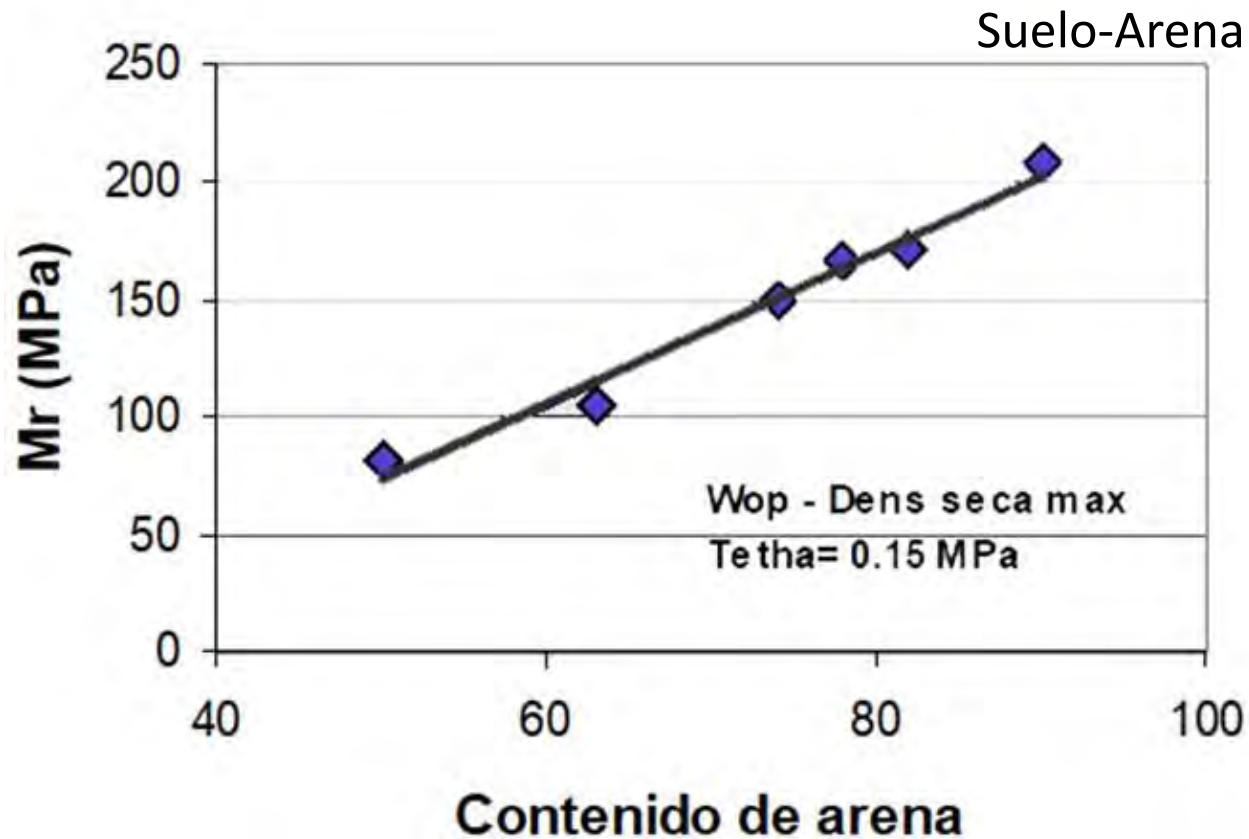


SUELOS

- Suelos Granulares

SERVICIO

- Tamaño, forma y distribución de partículas

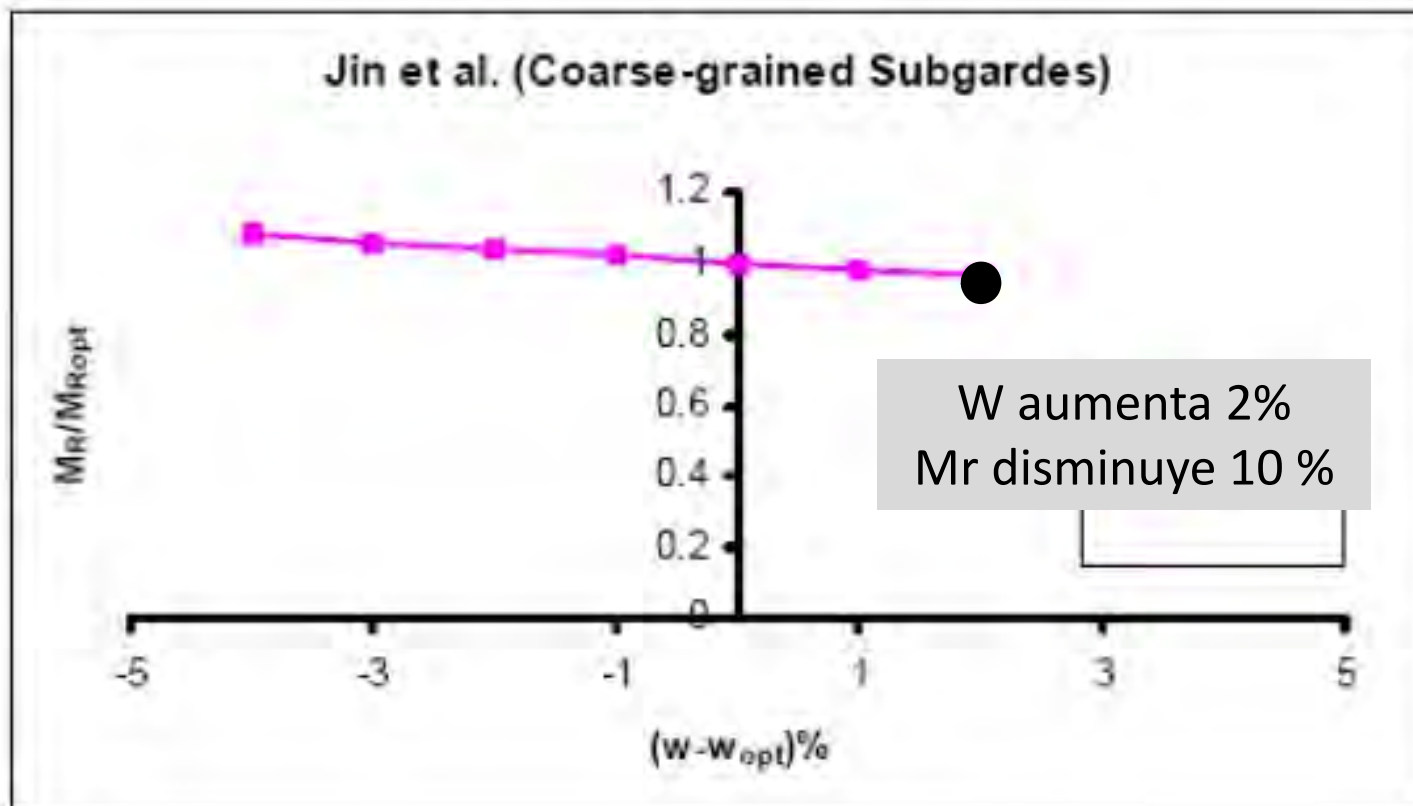


SUELOS

- Suelos Granulares

SERVICIO

- Contenido de humedad. Grado de Saturación



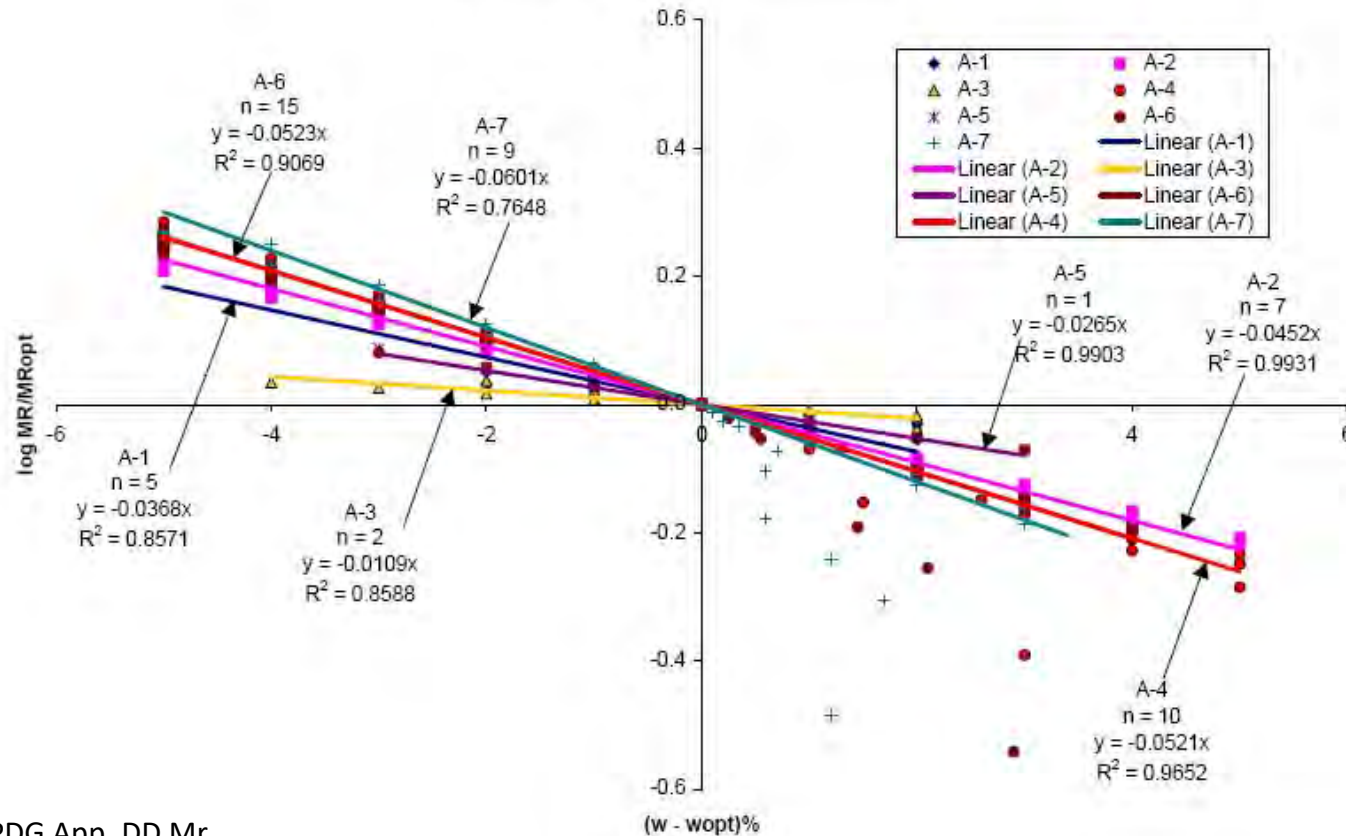
SUELOS

• Suelos Cohesivos y Granulares

Aumentos del ω

Disminución del M_r

All Materials by AASHTO Classification



Modelos de comportamiento Mr

1960

SEED, H
MONISMITH, C
University of
UC Berkeley
EEUU

1970

BROWN, S. F.
University of
Nottingham
UK

1980

PAUTE, J.L.
Univ. Gustave Eiffel
(LCPC/ Ifsttar)
France

1980

J. DE MEDINA,
E. PREUSSLER
Univ. Federal de
Rio de Janeiro
Brasil

1980

ANGELONE S.
MARTINEZ, F.
UNR Rosario
Argentina

1985

WITCZAK, MW.
UZAN, J.
University of
Maryland
EEUU

1985
A la
Actualidad

- Muchas Investigaciones
- Muchos autores
- Muchos Países

Modelos de Comportamiento de Mr

MODELOS RACIONALES

Función del estado de tensiones:

- ✓ Modelo bi-lineal
- ✓ Modelo semi-logarítmico
- ✓ Modelos hiperbólico
- ✓ Modelos log – log

MODELOS EMPIRICOS

Función de otras propiedades del suelo:
(CBR, DN, LL, IP, etc.)

MODELOS LOG – LOG

$$Mr = A \sigma_d^{-B}$$

Cohesivo puro

$$Mr = A \theta^B$$

Granular puro

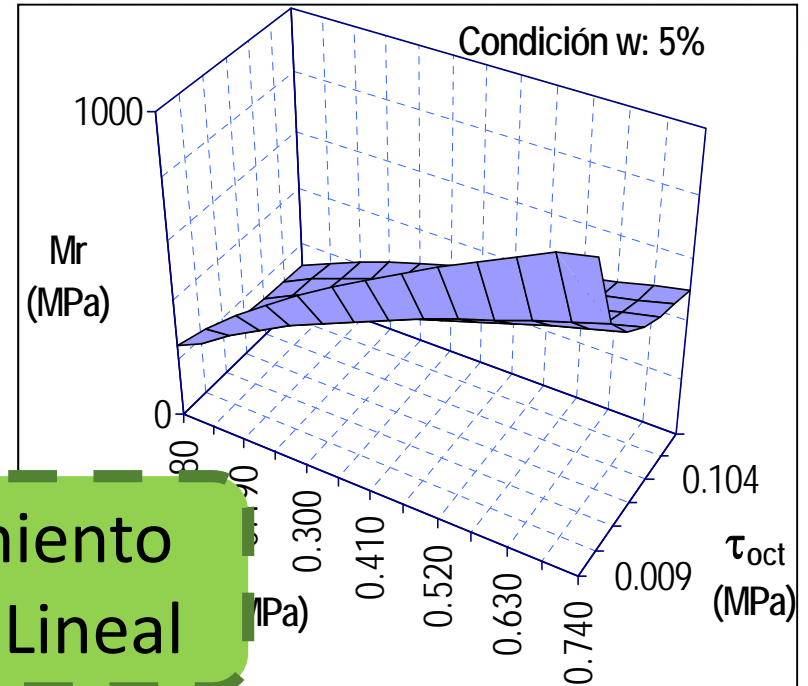
$$Mr = A \sigma_d^{-B} \theta^C$$

$$Mr = A \sigma_d^{-B} \sigma_3^C$$

$$Mr = A \tau_{oct}^{-B} \theta^C$$

$$Mr = A (\tau_{oct} + 1)^{-B} \theta^C$$

**Comportamiento
Elástico NO Lineal**



$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_d$$

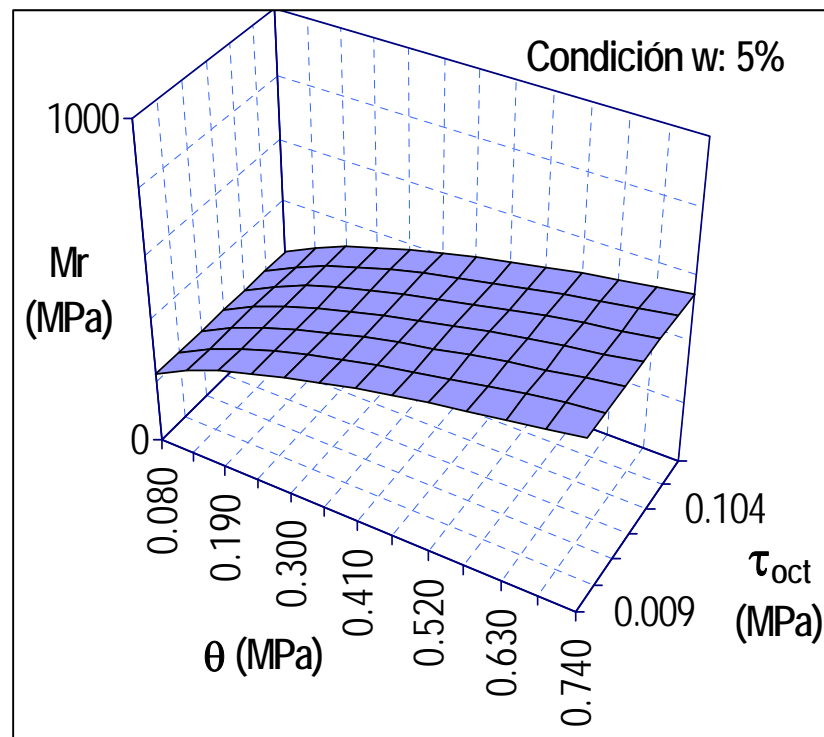
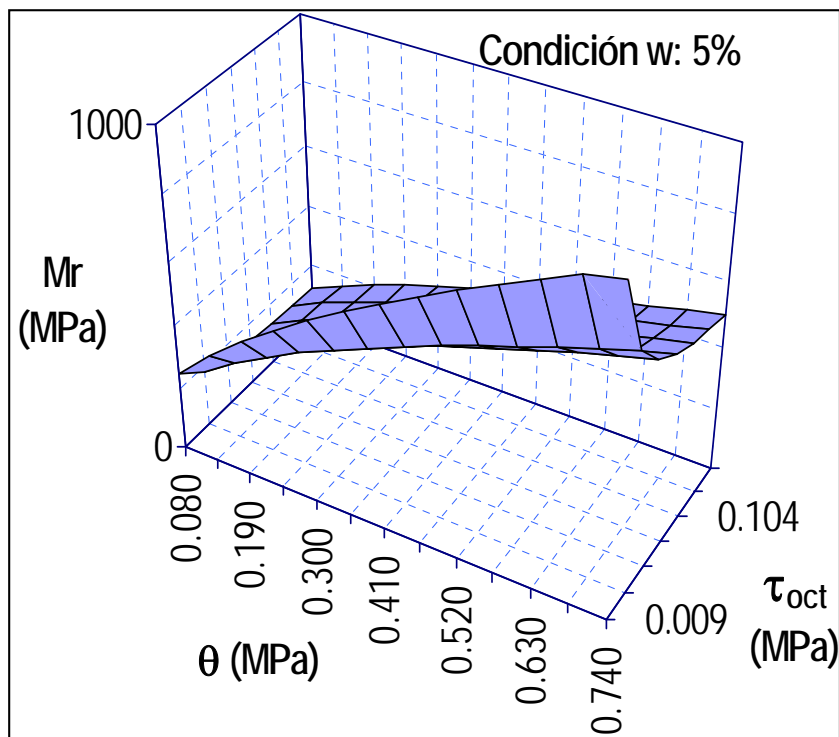
$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$$

$$(*) \quad \sigma_{to} = \tau_{octa} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{zy}^2)}$$

Modelos LOG – LOG para una arena limosa

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2}$$



Modelos de Comportamiento de Mr Empíricos

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

En general se correlaciona empíricamente las constantes experimentales k_1 , k_2 y k_3 como funciones de las propiedades índice o fundamentales de los suelos:

plasticidad, granulometría, densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo, la densidad seca y el contenido de humedad del espécimen durante el ensayo.

Se debe calibrar a los suelos locales

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Suelos finos (Fine-grained soils)

Suelos gruesos no plásticos
(Non-plastic Coarse-grained soils)

$$k_1 = 404.166 + 42.933PI + 52.260\gamma_d - 987.353 \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)$$

$$k_2 = 0.25113 - 0.0292PI + 0.5573 \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)$$

$$k_3 = -0.20772 + 0.23088PI + 0.00367\gamma_d - 5.4238 \left(\frac{w}{w_{opt}} \right)$$

Comportamiento
Elástico NO Lineal

$$k_1 = 568P_{No.4} - 6.112P_{No.40} - 578.337 \left(\frac{w}{w_{opt}} \right) \times \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \right)$$

$$k_2 = 0.5661 + 0.006711P_{No.40} - 0.02423P_{No.200} + 0.05849(w - w_{opt}) + 0.001242(w_{opt})(\gamma_{dmax})$$

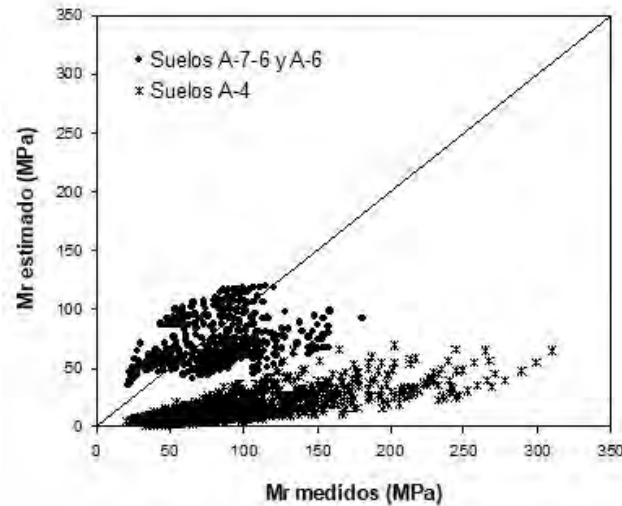
$$k_3 = -0.5079 - 0.041411P_{No.40} + 0.14820P_{No.200} - 0.1726(w - w_{opt}) - 0.01214(w_{opt})(\gamma_{dmax})$$

Modelos de Mr Empíricos

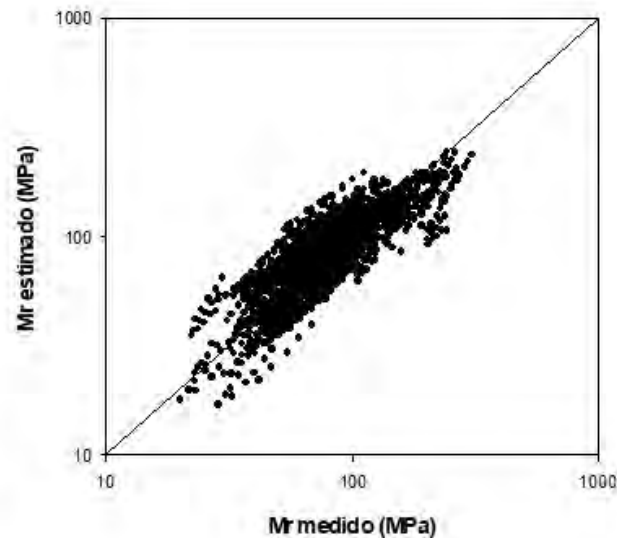
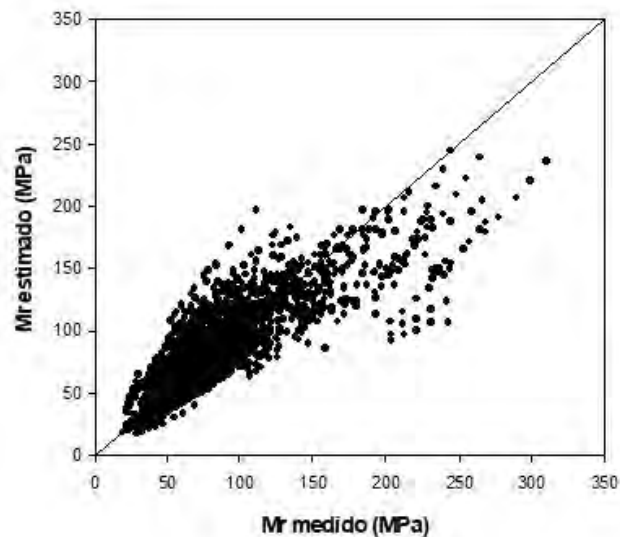
$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Recalibración de los Modelos propuestos por la Universidad de Wisconsin	
Para suelos finos cohesivos	
$k_1 = 226.3 - 3.43.PI + 307.7\gamma_d - 3691 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}} \right)$	Wisconsin subrasante: suelos finos
$k_2 = 0.30 - 0.013.PI + 0.15 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}} \right) \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \right)$	
$k_3 = -1.0 + 0.036.PI + 0.114 \cdot \gamma_d - 3.26 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}} \right)$	
Para suelos de granos gruesos no plásticos	
$k_1 = 8160 \cdot 65 - 6.293 P_{N^{\circ}4} - 13.567 P_{N^{\circ}40} - 4930 \cdot 51 \left(\frac{\omega}{\omega_{opt}} \right) \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \right)$	Wisconsin Arenas
$k_2 = 0.547 - 0.0003 P_{N^{\circ}40} + 0.0082 P_{N^{\circ}200} - 0.018 (\omega - \omega_{opt}) - 0.001 \omega_{opt} \cdot \gamma_{dmax}$	
$k_3 = 0.361 + 0.009 P_{40} - 0.00748 P_{200} + 0.114 (\omega - \omega_{opt}) - 0.005 \cdot \omega_{opt} \cdot \gamma_{dmax}$	

Modelos de Mr Empíricos de Wisconsin subrasante: suelos finos



Modelos
Sin calibrar



Modelos
recalibrados

Modelos de Mr Empíricos

$$M_r = 10 \text{ CBR}$$

$$M_r = 38 \text{ CBR}^{0.711}$$

$$M_r = 18 \text{ CBR}^{0.64}$$

$$M_r = B \cdot \text{CBR}$$

$$M_r = 200 \cdot \text{DN}^{-0.5}$$

$$M_r = 400 \cdot \text{DN}^{-0.5}$$

Comportamiento
Elástico Lineal



Modelos que depende de propiedades de otros ensayos.

Se debe calibrar a las condiciones locales

Strength/Index Property	Model	Comments	Test Standard
CBR	$M_r = 2555(\text{CBR})^{0.64}$ (TRL) Mr, psi	CBR = California Bearing Ratio, percent	AASHTO T193, "The California Bearing Ratio"
R-value	$M_r = 1155 + 555R$ (20) Mr, psi	R = R-value	AASHTO T190, "Resistance R-Value and Expansion Pressure of Compacted Soils"
AASHTO layer coefficient	$M_r = 30000 \left(\frac{a_i}{0.14} \right)$ (20) Mr, psi	a_i = AASHTO layer coefficient	AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures
PI and gradation*	$\text{CBR} = \frac{75}{1 + 0.728(\text{wPI})}$ (see Appendix CC)	wPI = P200*PI P200= percent passing No. 200 sieve size PI = plasticity index, percent	AASHTO T27, "Sieve Analysis of Coarse and Fine Aggregates" AASHTO T90, "Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils"
DCP*	$\text{CBR} = \frac{292}{\text{DCP}^{1.12}}$	CBR = California Bearing Ratio, percent DCP =DCP index, mm/blow	ASTM D 6951, "Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications"

*Estimates of CBR are used to estimate M_r .

Valores de Mr registrados

Comportamiento Elástico Lineal

El Mr depende de:

- El lugar, la zona
- La estructura del pavimento
- Humedad, densidad
- El drenaje
- Etc.

TIPO DE SUELO	RANGO Mr		Mr Típico (Mpa)
	minimo	máximo	
A-1-a	265	289	276
A-1-b	245	276	262
A-2-4	193	258	220
A-2-5	165	227	193
A-2-6	148	214	179
A-2-7	148	193	165
A-3	169	245	200
A-4	148	200	165
A-5	117	176	138
A-6	93	165	117
A-7-5	55	121	83
A-7-6	34	93	55

No hay que generalizarlo

Ensayo de Módulo Resiliente

**ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO PARA
DETERMINAR
EL MODULO RESILIENTE DE SUELOS Y
MATERIALES GRANULARES NO LIGADOS**



Revisión de los Procedimientos de Ensayo de Mr:

1978

MANUAL
ASPHALT
INSTITUTE

1982

AASHTO T
274 – 82

1991

AASHTO T
292 – 91

1992

AASHTO T
294 – 92 –
Protocolo
SHRP 46

1996

AASHTO T
292 – 91
(96)

1998

NCHRP 1-28
(National
Cooperative
Highway
Research
Program).

Dr. M. Witzak

1999

AASHTO T
307 – 99

2004

CEN EN
13286-7
(CCP y VCP)

2012

AASHTO T
307 – 99
(2012)

2013

NCHRP 445
Dr. E.
Tutumluer

AASHTO T 307-99 (2012), STANDARD METHOD OF TEST FOR DETERMINING THE RESILIENT MODULUS OF SOILS AND AGGREGATE MATERIALS

ENSAYO TRIAXIAL DINAMICO

16 CONDICIONES DE TENSIONES APLICADAS

1000 ciclos de acondicionamiento inicial y 100 ciclos para cada una de las otras condiciones

Protocolos de tensiones aplicadas σ_3 y σ_d son diferentes dependiendo:

- Si es Suelo Fino o Granular
- Si es Subrasante o Sub-base

SOFTWARE DE CONTROL DE ENSAYO Y ADQUISICIÓN DE DATOS

AASHTO T 307, STANDARD METHOD OF TEST FOR DETERMINING THE RESILIENT MODULUS OF SOILS AND AGGREGATE MATERIALS

This method covers procedures for preparing and testing untreated subgrade soils and untreated base/subbase materials for determination of resilient modulus (M_r) under conditions representing a simulation of the physical conditions and stress states of materials beneath flexible pavements subjected to moving wheel loads.

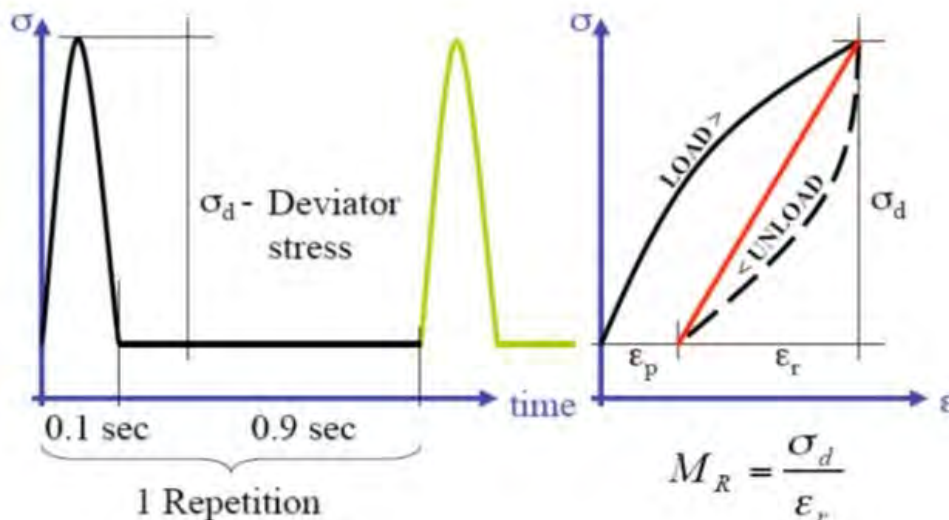
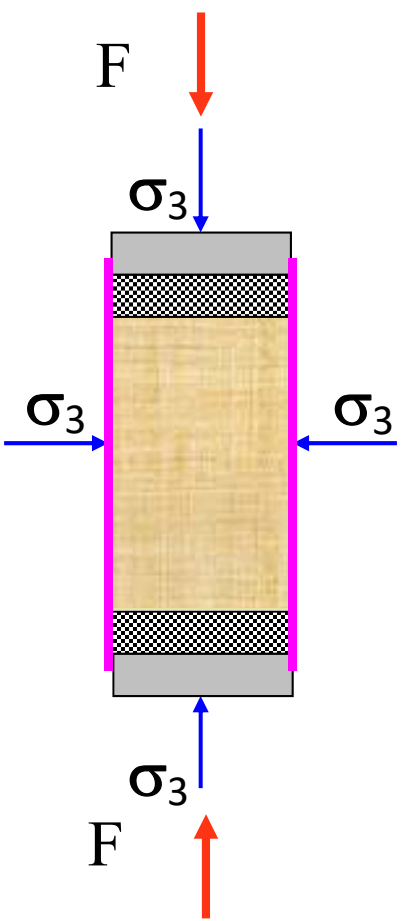
The methods described are applicable to undisturbed samples of natural and compacted subgrade soils, and to disturbed samples of subgrade soils and untreated base/subbase prepared for testing by compaction in the laboratory.

In this method, stress levels used for testing specimens for resilient modulus are based upon the location of the specimen within the pavement structure. Samples located within the base and subbase are subjected to different stress levels as compared to those specimens that are from the subgrade. Generally, specimen size for testing depends upon the type of material based upon the gradation and the plastic limit of the material as described in a later section.

The value of resilient modulus determined from this procedure is a measure of the elastic modulus of untreated base and subbase materials and subgrade soils recognizing certain nonlinear characteristics.

Resilient modulus values can be used with structural response analysis models to calculate the pavement structural response to wheel loads, and with pavement design procedures to design pavement structures.

Ensayo Triaxial Dinámico - Módulo Resiliente



σ_3 , Presión de confinamiento = Cte

F, Tensión desviadora cíclica/pulsante, variable

Drenajes abiertos

Se mide: σ_3 , F y los desplazamientos en la parte central de la probeta





Confección de probetas

☐ **Suelos finos cohesivos:**

Estática a densidad controlada

D= 70 mm H= 140 mm

☐ **Granulares con cohesión y sin cohesión:**

Estática a densidad controlada o Vibrocompactación

D= 70 mm H= 140 mm (arenas)

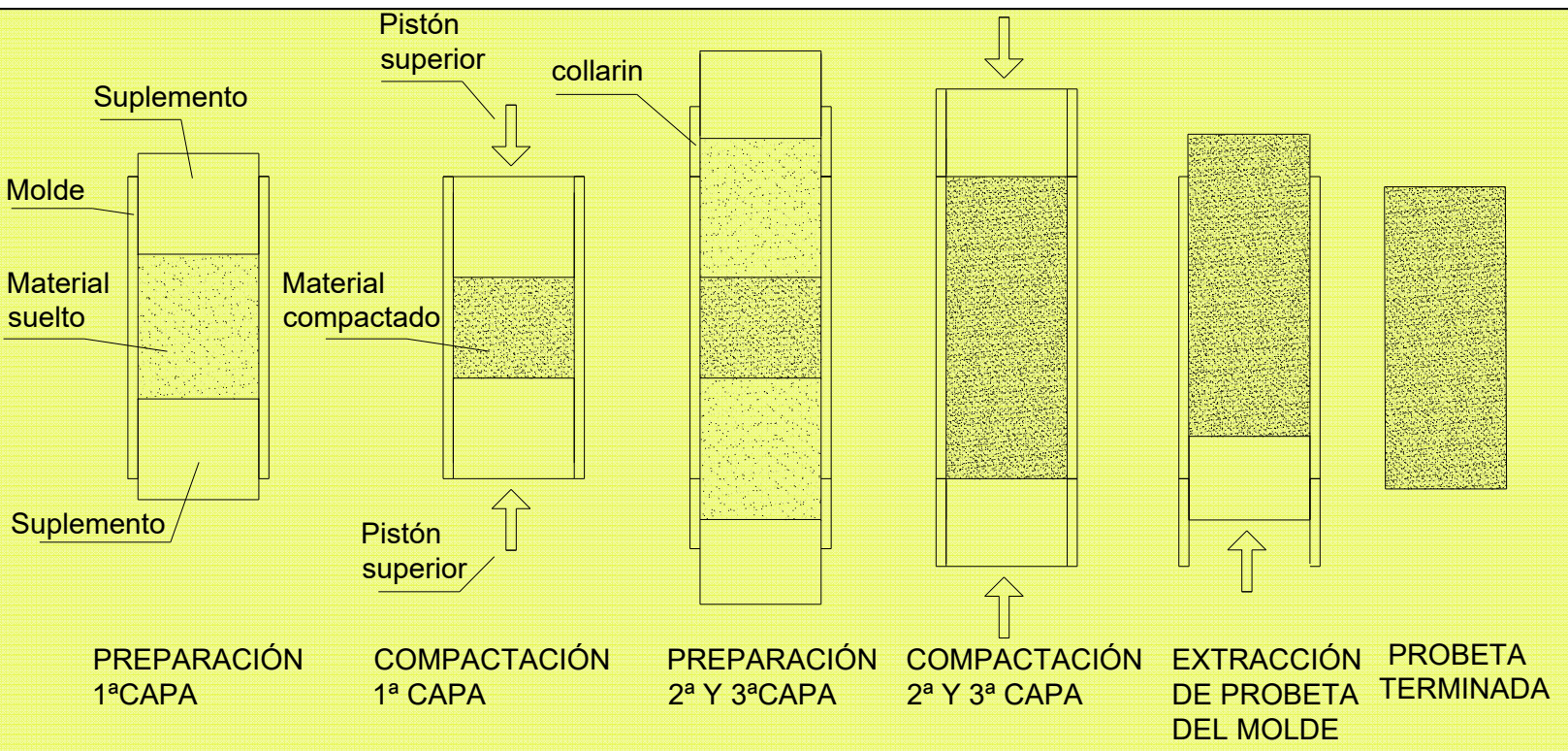
D= 100 mm H= 200 mm (gravas)

D= 150 mm H= 300 mm (gravas)



Confección de probetas

Método de compactación estática a densidad prefijada para **suelos con cohesión**.



Confección de probetas

Método de compactación vibratoria para **suelos granulares** (arenas) con cierto grado de cohesión

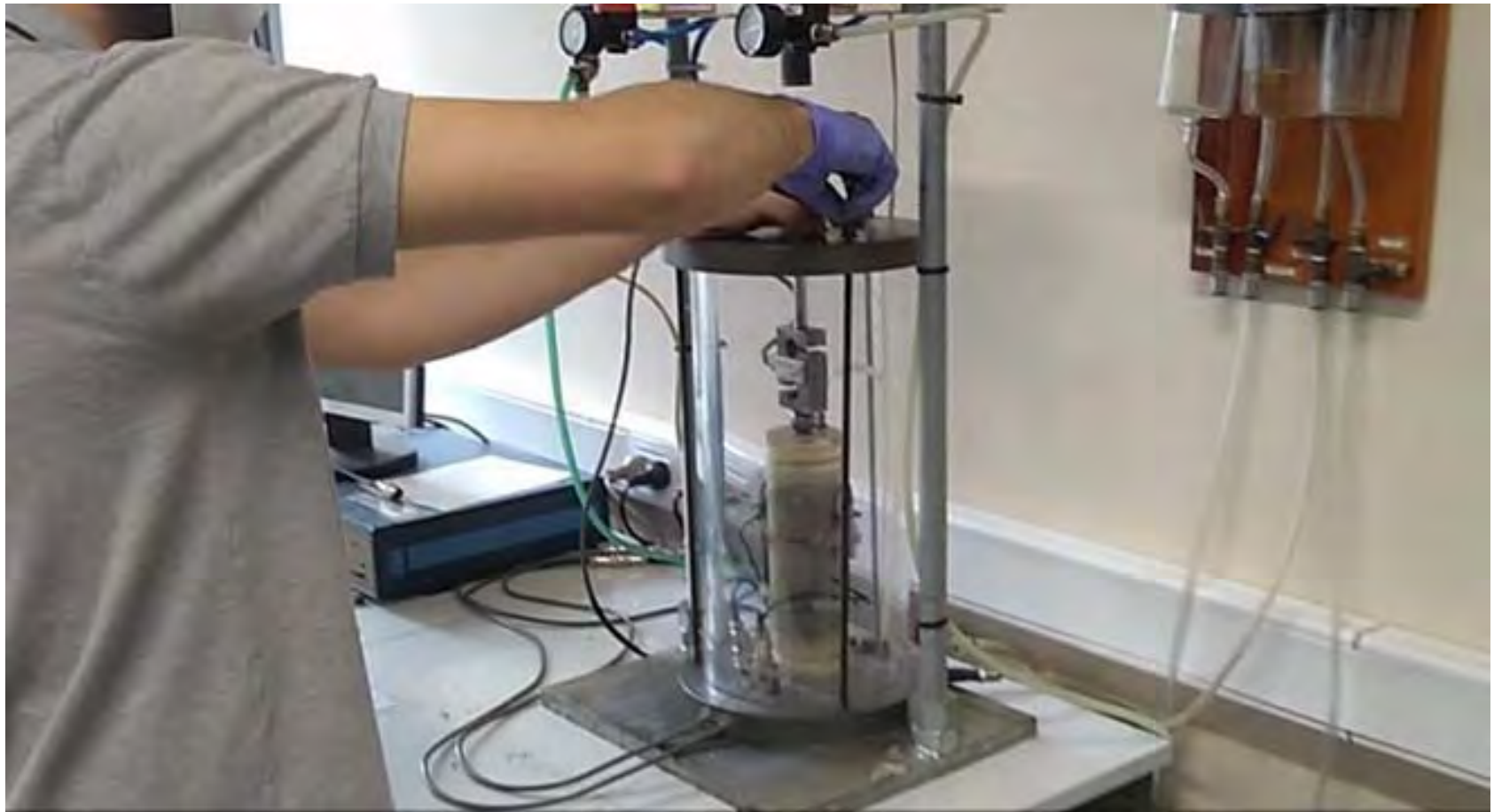


Confección de probetas

Método de compactación vibratoria para **suelos granulares** (gravas) con cierto grado de cohesión



Procesamiento de Datos de Ensayo



Procesamiento de Datos de Ensayo

ANTES DEL ENSAYO

- Identificación/nombre
- Fecha de ensayo
- Tipo de Suelo/Clasificación
- Ensayo de Compactación
- Peso húmedo
- Diámetro, Altura
- Observaciones

DESPUÉS DEL ENSAYO

- Contenido de humedad
- Densidad Seca
- % de Compactación

ENSAYO DE MODULO RESILIENTE			
Fecha:	04-15-2013	Tipo de Suelo:	A7(14)
Probeta:	S2P2	Humedad (%):	26.60
Diámetro (mm):	70.59	Desn Seca (gr/cm ³):	1.183
Altura (mm):	153.22	% Compactación:	97.1%

σ_3 , Presión de confinamiento = Cte

F_c , Tensión desviadora cíclica/pulsante, variable

Drenajes abiertos

Se mide: σ_3 , F y los desplazamientos en la parte central de la probeta

$$\sigma_d = \frac{F_c}{A_i}$$

$$\epsilon_r = \frac{\text{Desplazamientos}}{\text{Base de medida}}$$

Un valor de M_r para cada estado de tensiones

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Procesamiento de Datos de Ensayo

9	PASO	N. CICLOS	FUERZA	SIGMA3	DEF.MIN	DEF MAX	M. RES	DEF.PERM
10	2	1	4.33E-03	4.14E-02	-1550.32	-1550.02	261.53	3.56E-01
11	2	2	7.48E-03	4.13E-02	-1551.71	-1551.71	-1.00	3.54E-01
12	2	3	6.69E-03	4.14E-02	-1552.25	-1551.82	287.06	3.53E-01
13	2	4	5.12E-03	4.14E-02	-1553.04	-1552.67	256.41	3.52E-01
14	2	5	4.72E-03	4.13E-02	-1553.34	-1552.79	157.81	3.51E-01
15	2	6	4.33E-03	4.13E-02	-1553.40	-1552.61	99.87	3.51E-01
16	2	7	5.51E-03	4.13E-02	-1553.65	-1552.80	118.07	3.51E-01
17	2	8	5.51E-03	4.12E-02	-1553.64	-1552.92	137.91	3.51E-01
18	2	9	4.72E-03	4.12E-02	-1553.77	-1553.34	202.98	3.51E-01
19	2	10	5.90E-03	4.13E-02	-1553.89	-1553.22	160.53	3.51E-01
20	2	11	6.30E-03	4.12E-02	-1554.55	-1554.06	235.72	3.50E-01
21	2	12	7.48E-03	4.12E-02	-1554.55	-1554.19	374.75	3.50E-01
22	2	13	4.72E-03	4.12E-02	-1554.55	-1553.94	141.11	3.50E-01
23	2	14	4.33E-03	4.12E-02	-1554.86	-1553.94	86.47	3.49E-01
24	2	15	1.81E-02	4.13E-02	-1554.98	-1551.19	87.16	3.49E-01

- Una vez finalizado el ensayo se exporta un archivo Excel
- Se descarta el Paso 1: los 1000 ciclos de acondicionamiento
- Quedan los Pasos 2 a 16



Procesamiento de Datos de Ensayo

SUMA									
=+PROMEDIO(G205:G209)									
	A	B	C	PROMEDIO(número1, [número2], ...)			G	H	
1	IDENTIFICACION:		P1Suelo						
2									
3	FECHA:		9-jun						
4	OBSERVACIONES:		Probeta 1. Suelo solo						
5									
6	PESO:		929.4						
7	DIAMETRO:		69.9						
8	ALTURA:		151.33						
9	PASO	N. CICLOS	FUERZA	SIGMA3	DEF. MIN	DEF. MAX	M. RES	DEF. PERM	
200	3	91	1.07E-01	4.06E-02	-1551.28	-1513.60	51.62	3.54E-01	
201	3	92	1.07E-01	4.08E-02	-1551.16	-1513.41	51.72	3.54E-01	
202	3	93	1.07E-01	4.10E-02	-1551.64	-1512.99	50.51	3.54E-01	
203	3	94	1.08E-01	4.12E-02	-1551.04	-1512.44	51.15	3.55E-01	
204	3	95	1.07E-01	4.15E-02	-1550.79	-1512.44	51.09	3.55E-01	
205	3	96	1.09E-01	4.20E-02	-1550.55	-1512.14	51.95	3.55E-01	
206	3	97	1.09E-01	4.24E-02	-1550.12	-1511.83	51.92	3.56E-01	
207	3	98	1.08E-01	4.27E-02	-1549.64	-1511.47	51.52	3.57E-01	
208	3	99	1.08E-01	4.31E-02	-1549.15	-1511.29	52.13	3.57E-01	
209	3	100	1.07E-01	4.34E-02	-1548.97	-1511.04	51.48	3.58E-01	
210	4	1	1.08E-01	4.54E-02	-1548.30	-1510.62	52.19	3.59E-01	
211	4	2	1.05E-01	4.55E-02	-1545.69	-1509.65	53.17	3.62E-01	
212	4	3	1.05E-01	4.56E-02	-1545.99	-1508.98	51.97	3.62E-01	
213	4	4	1.06E-01	4.55E-02	-1546.05	-1508.73	51.73	3.62E-01	
214	4	5	1.06E-01	4.55E-02	-1545.87	-1508.98	52.52	3.62E-01	
215	4	6	1.07E-01	4.54E-02	-1545.93	-1508.86	52.46	3.62E-01	
216	4	7	1.11E-01	4.51E-02	-1545.93	-1508.01	53.18	3.62E-01	
217	4	8	1.18E-01	4.49E-02	-1545.99	-1504.72	52.00	3.62E-01	

- Se toma el promedio de los últimos 5 valores medidos
- Se descartan los que están fuera de rango

En MPa			
Mr promedio	Sd promedio	S3	θ promedio
=+PROMEDI	0.028	0.043	0.156

Procesamiento de Datos de Ensayo

Los valores promedios se disponen en una tabla de cálculo

PASO	Mr medido	σ_d	σ_3	τ_{octa}	θ
2	134	0.013	0.042	0.006	0.139
3	119	0.029	0.042	0.014	0.155
4	102	0.046	0.042	0.022	0.172
5	95	0.057	0.042	0.027	0.183
6	87	0.070	0.042	0.033	0.196
7	117	0.014	0.021	0.007	0.077
8	103	0.028	0.021	0.013	0.091
9	88	0.042	0.021	0.020	0.105
10	81	0.056	0.021	0.026	0.119
11	78	0.068	0.021	0.032	0.131
12	125	0.014	0.010	0.007	0.044
13	91	0.029	0.010	0.014	0.059
14	79	0.044	0.010	0.021	0.074
15	74	0.058	0.010	0.027	0.088
16	70	0.069	0.010	0.033	0.099

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_d$$

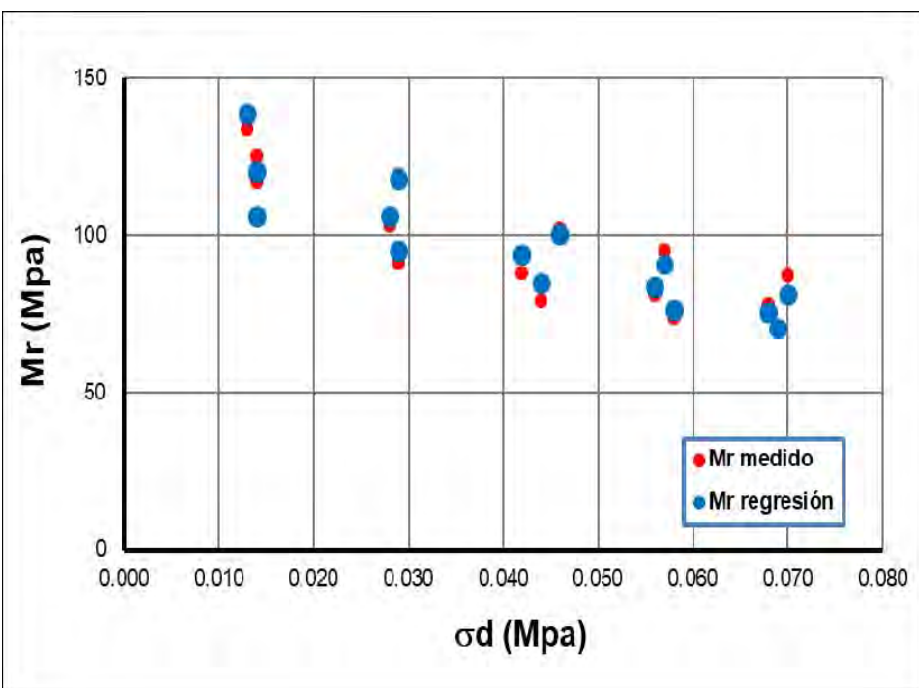
$$\theta = \sigma_d + 3 \cdot \sigma_c$$

Procesamiento de Datos de Ensayo

Suelos Cohesivos

$$\frac{Mr}{p_a} = 1498 \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{-2.74} \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{0.22}$$

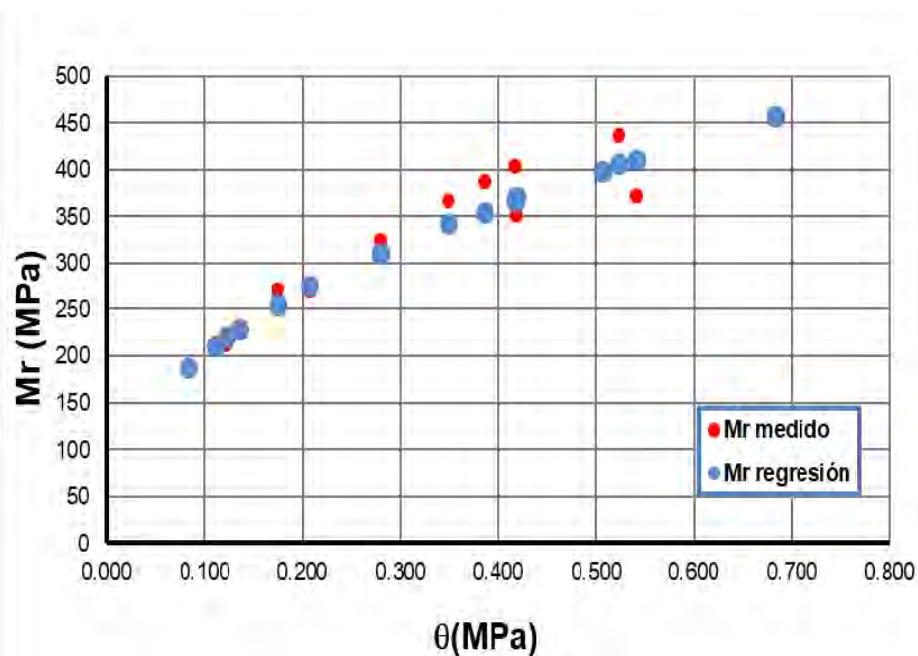
$$r^2 = 0.90$$



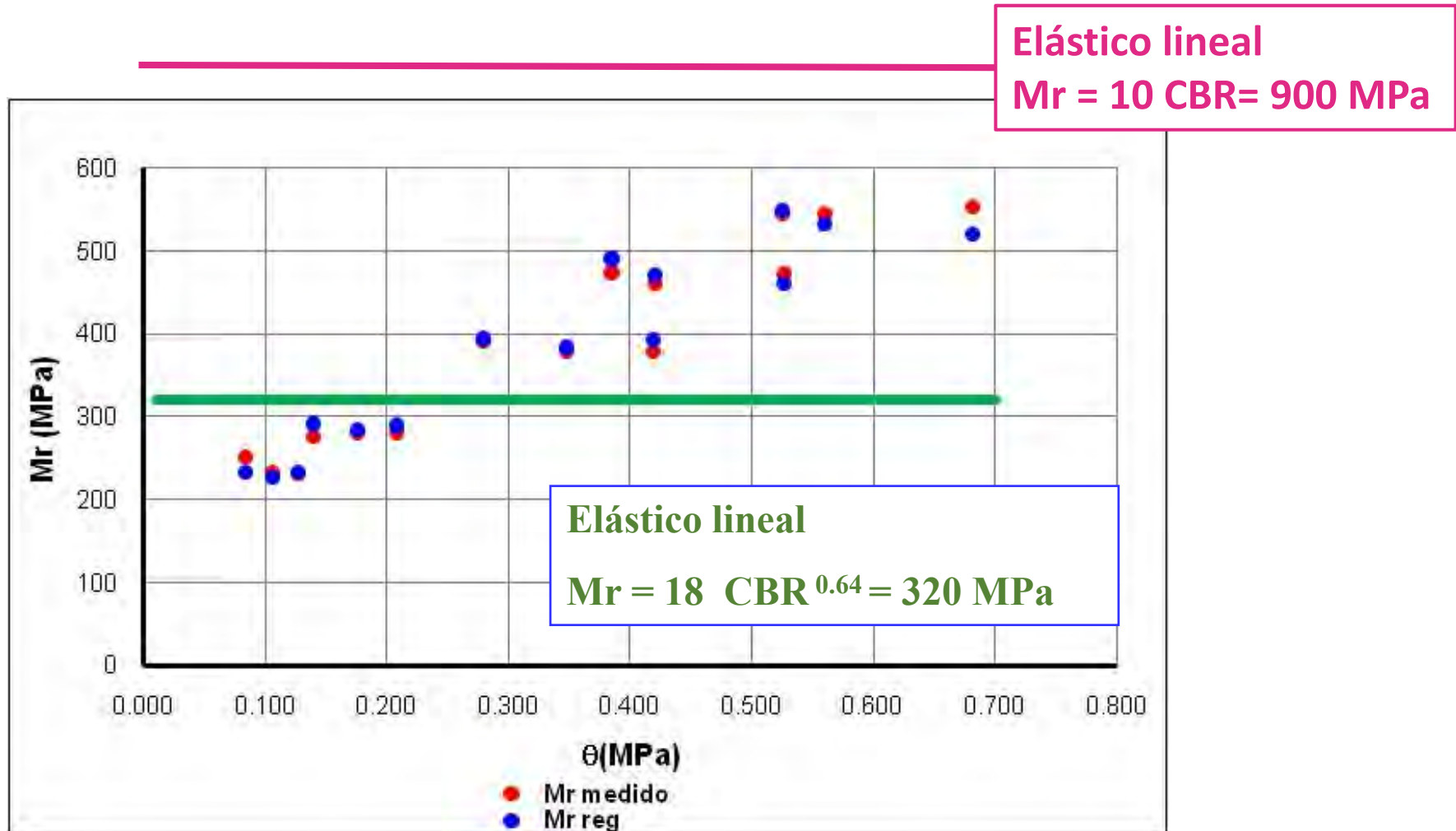
Suelos granulares

$$\frac{Mr}{p_a} = 1986 \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{-0.03} \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{0.41}$$

$$r^2 = 0.92$$



Comparación de Modelos Lg-Log y Empíricos

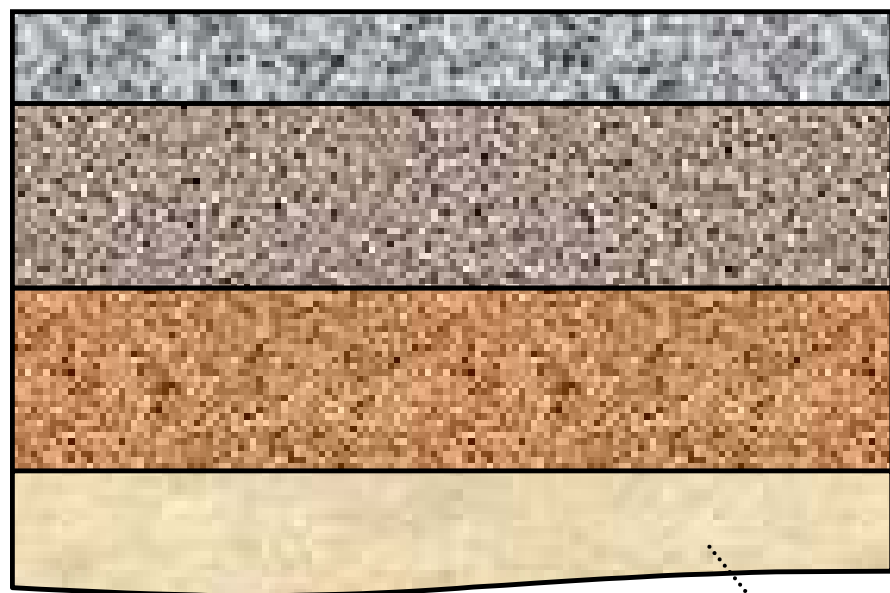


Estudio de Caso: Importancia de una caracterización adecuada del Mr



1 año en servicio
Fallas prematuras
Vida de diseño: 7 años

Estudio de Caso: Estructura del pavimento

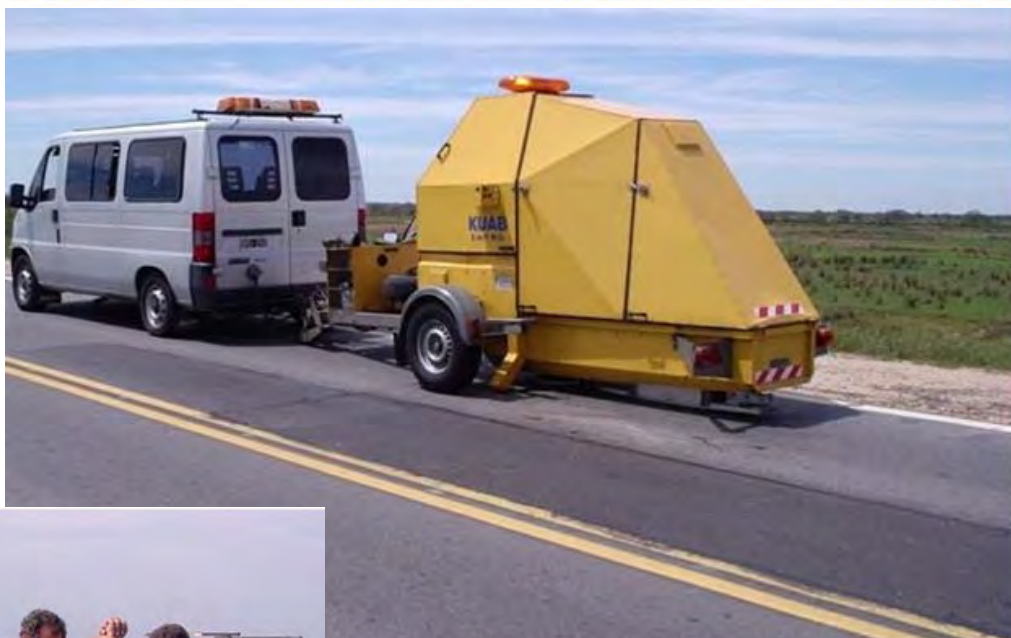


Capa Asfáltica, $e = 10\text{cm}$

Base Granular, $e = 20\text{cm}$

Subbase Granular, $e = 20\text{cm}$

Subrasante Granular



- Evaluación Estructural
- Ensayos de laboratorio
- (mezclas asfálticas y suelos Mr)
- Modelización
Mecanicista Estructural



Estudio de Caso: Modelos de análisis estudiados

Programa Empírico Mecanicista BackViDe de IMAE

Alternativa N°1:

Caracterización de capas no ligadas mediante correlaciones con CBR

$$Mr = 18 \text{ CBR}^{0.64}$$

Comportamiento
Elástico Lineal

Alternativa N°2:

Caracterización de capas no ligadas mediante ecuaciones constitutivas

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{\text{oct}}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Comportamiento
Elástico NO Lineal

Estudio de Caso: Mr del Análisis Estructural

Programa Empírico Mecanicista BackViDe de IMAE

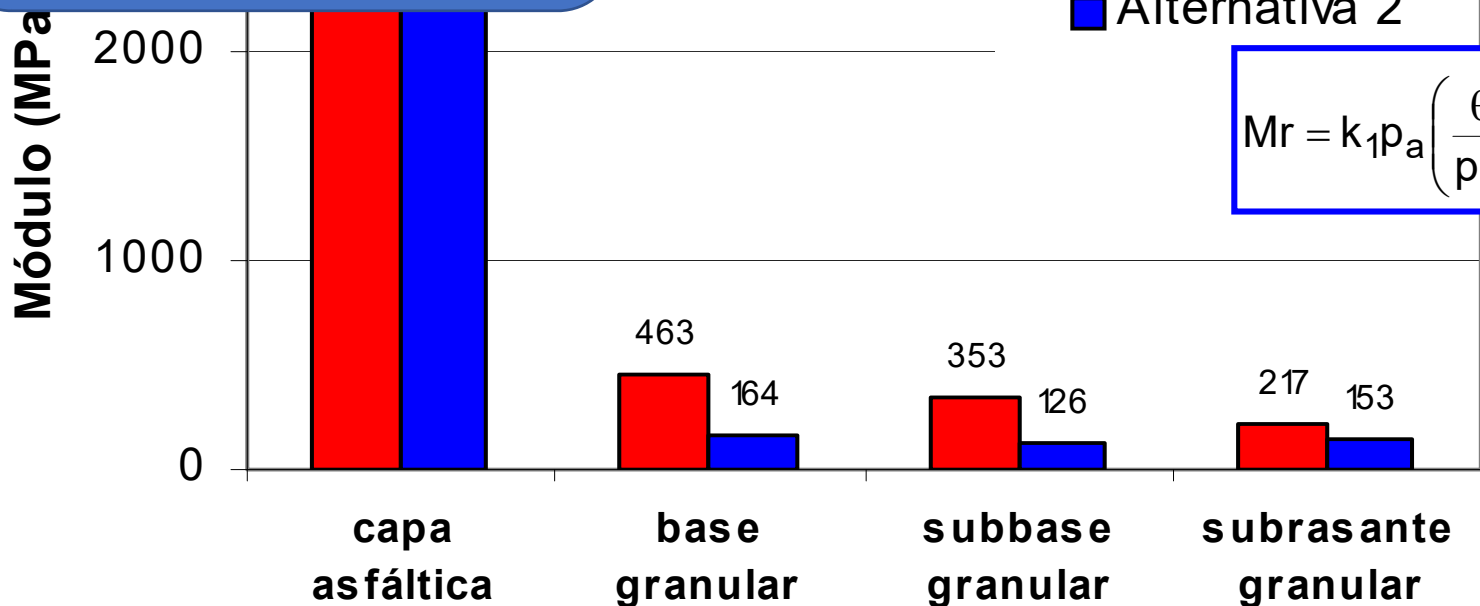
Para este Caso:
El Mr empírico sobrevaloró al
material granular

Vida en servicio
calculada con
No linealidad fue de
1 año

$$Mr = 18 \text{ CBR}^{0.64}$$

- Alternativa 1
- Alternativa 2

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$



Estudio de Caso: Vida en servicio

Vida en servicio
calculada con
No linealidad fue de
1 año

$$Mr = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$$

Vida estimada =
Fallas prematuras
1 año

ENSAYO EN
ESCALA 1:1

Estudio de Caso: Consecuencias

- Inadecuada caracterización de los materiales granulares
- Vida de servicio original **7 años**
- Fallas prematuras**
- Vida en servicio aplicando Mr medidos en laboratorio y no linealidad **1 año**
- Reconstrucción de tramos
- Mayores costos** materiales y del usuario



Consideraciones Finales

- La determinación del M_r a través del ensayo triaxial dinámico es imprescindible en rutas con tránsitos elevados.
- El M_r es uno de los “Inputs” o “Parámetro de Ingreso” necesario para poder usar un Método de Diseño Mecanista de Pavimentos
- Se debe considerar el comportamiento Elástico NO Lineal de los suelos y materiales granulares no ligados.
- El uso de modelos Modelos Empíricos para establecer el M_r mediante una ecuación constitutiva es posible si se calibra a condiciones locales.

Consideraciones Finales

- El ensayo CBR no describe el comportamiento dinámico de los suelos y materiales granulares no ligados.
- El uso de modelos empíricos del M_r en función del CBR puede tanto sobrevalorar como subvalorar las características resiliente de los mismos.
- El valor de M_r obtenido a través del DN (Índice de Penetración) del ensayo DCP es un muy buen valor semilla para usar en los Método de Diseño Mecanista de Pavimentos

Muchas gracias

¿Consultas?



Módulo Resiliente de Suelos y Materiales No Ligados

<https://www.fceia.unr.edu.ar/laboratoriovial/publicaciones.php>

<https://www.fceia.unr.edu.ar/laboratoriovial/descarga.php>

Prof. Dra. Inga. Silvia Angelone

Laboratorio Vial

Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE)

Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Universidad Nacional de Rosario. Argentina

