



ASOCIACIÓN PARAGUAYA DE CARRETERAS



SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL

# MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

DISERTANTE:

Dr. Ing. Alejandro Quiñonez - Paraguay

APOYAN:



TETĀ REMBIAPO  
HA MARANDU  
Morenondecha  
Ministerio  
OBRAS PÚBLICAS  
Y COMUNICACIONES



UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE ASUNCIÓN  
FACULTAD DE  
INGENIERÍA



COMISIÓN PERMANENTE  
DEL ASFALTO



# MODULO RESILIENTE EN SUELOS

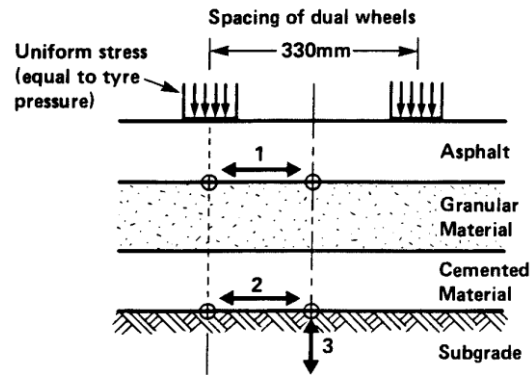
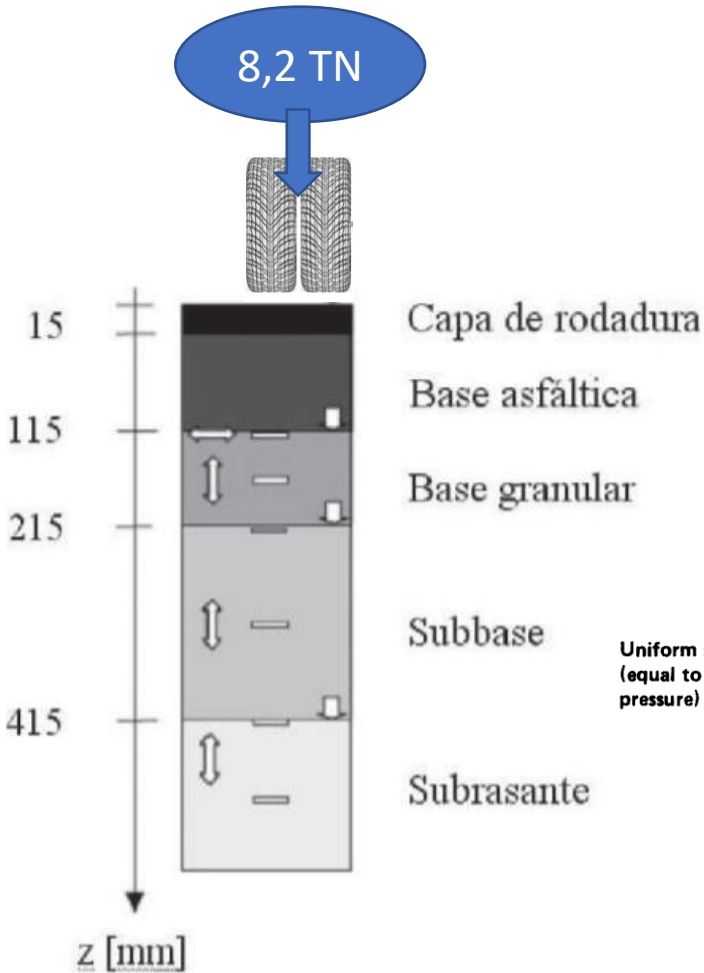


# 1. Concepto de Resiliencia

1955- Francis Hveem (California)

- ❖ Resiliencia: “elasticidad” en materiales de pavimentación (desplazamientos son mucho mayores que en otros sólidos elásticos)
- ❖ Agrietamiento progresivo de revestimientos asfálticos se debe a la deformación resiliente (elástica) de las capas subyacentes, en especial la subrasante.
- ❖ En mezclas asfálticas  $\Rightarrow$  rigidez (*stiffness*)

# 1. Introducción



- 1 Tensile strain at bottom of asphalt
- 2 Tensile strain at bottom of cemented material
- 3 Compressive strain at top of subgrade

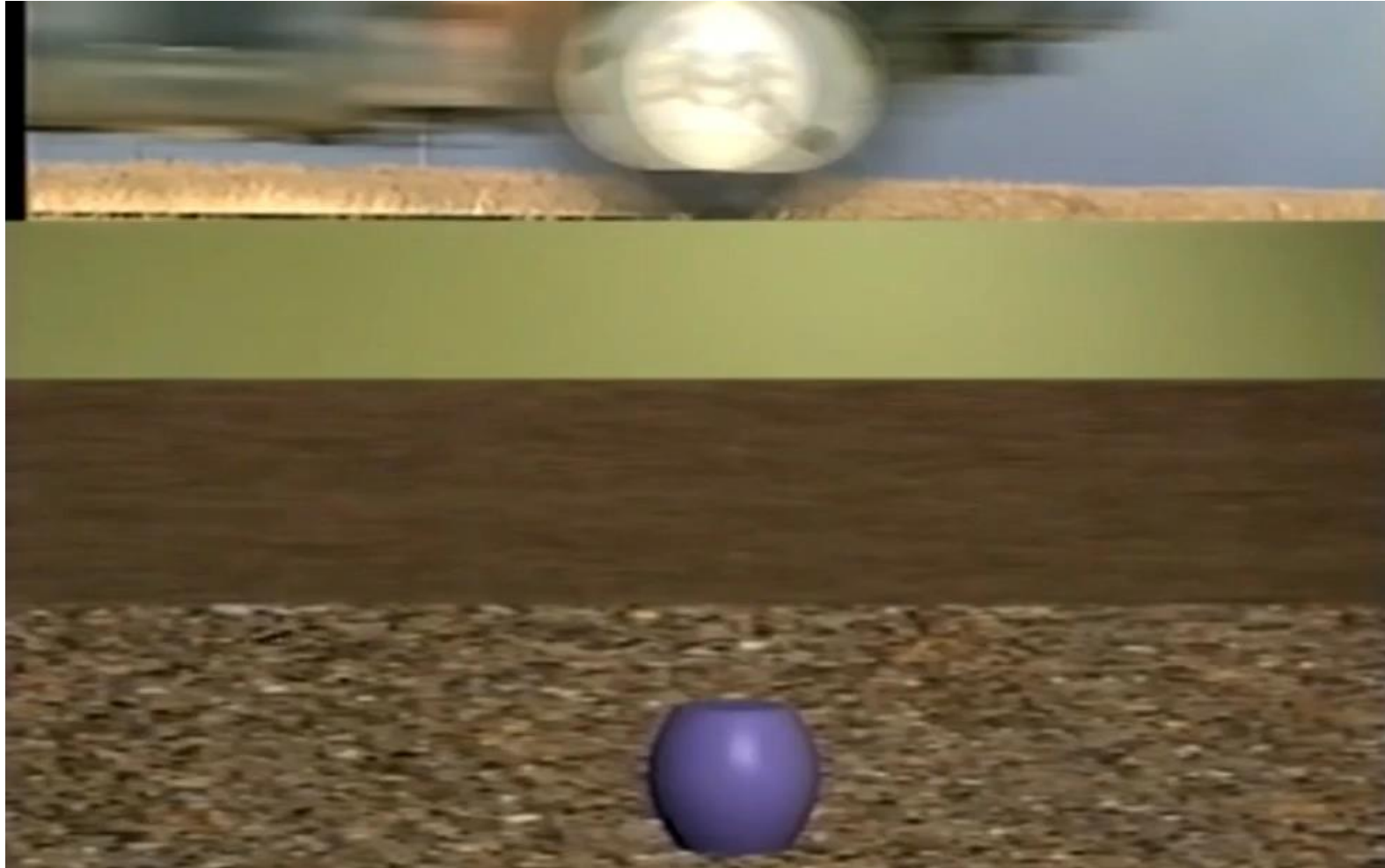
⊕ Denotes likely locations of critical strains due to applied loading

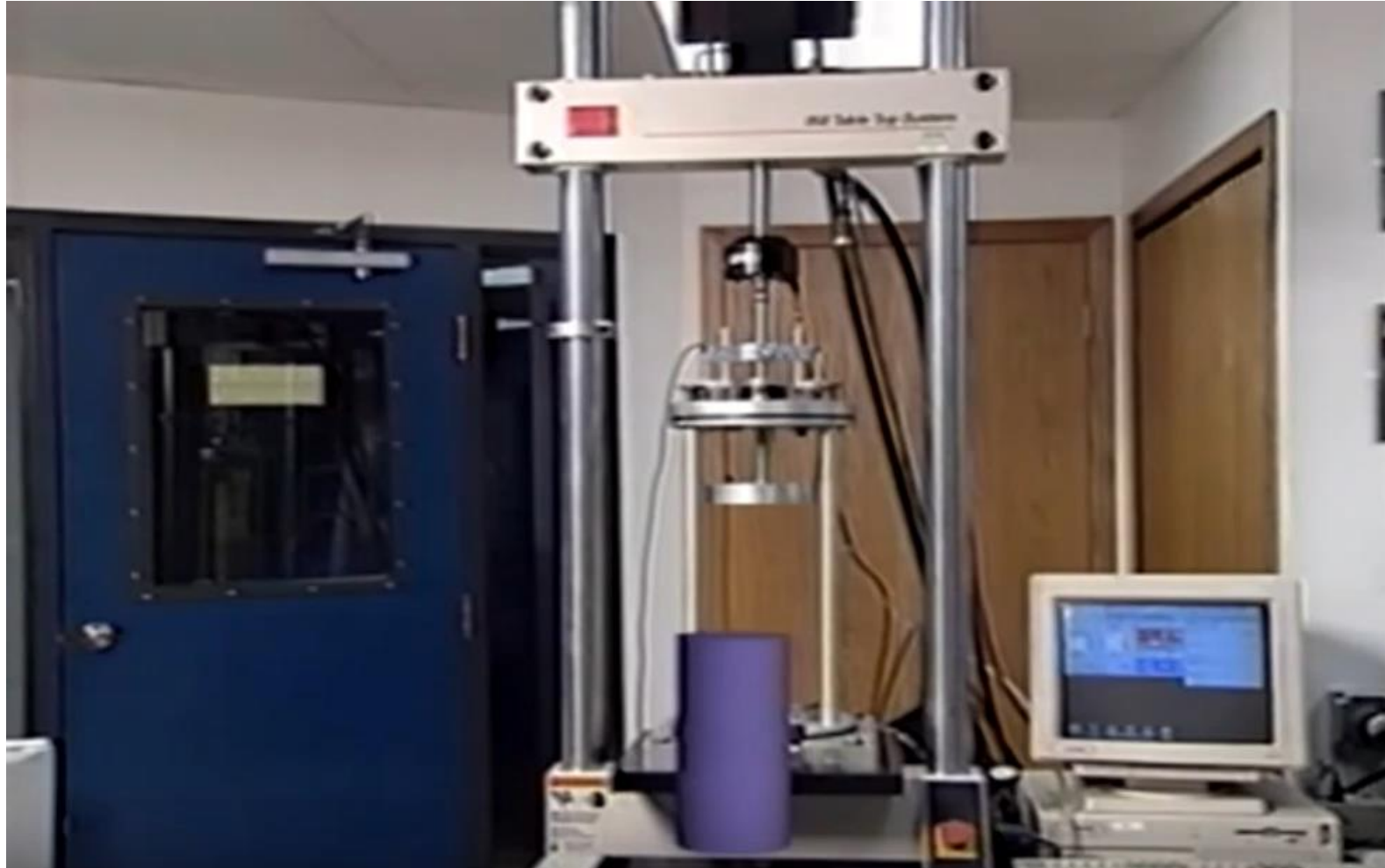


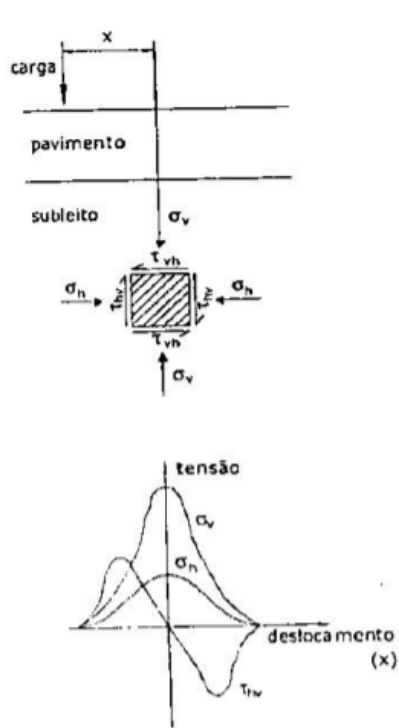


## 2. Ensayos de cargas repetidas

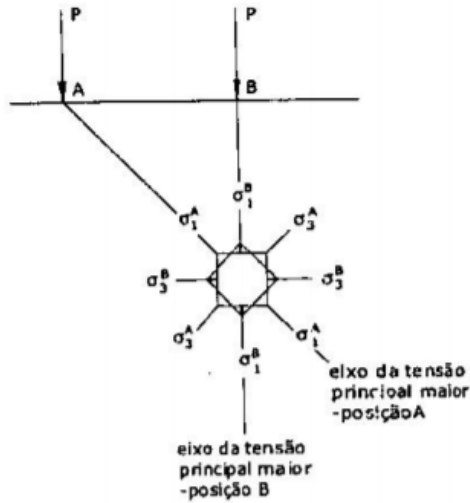
- ❖ Ensayos tecnológicos que buscan simular las condiciones reales de sollicitaciones en el campo
- ❖ Tráfico genera:
  - Cargas repetidas de corta duración con intervalos de reposo en materiales que trabajan a la:
    - Compresión (confinada)
    - Tracción en la Flexión
- ❖ No ocurre ruptura catastrófica y si un **progresivo debilitamiento de la estructura**, agravado (o no) por condiciones ambientales.







(a) - tensões normais e tangenciais



(b) - rotação dos planos principais

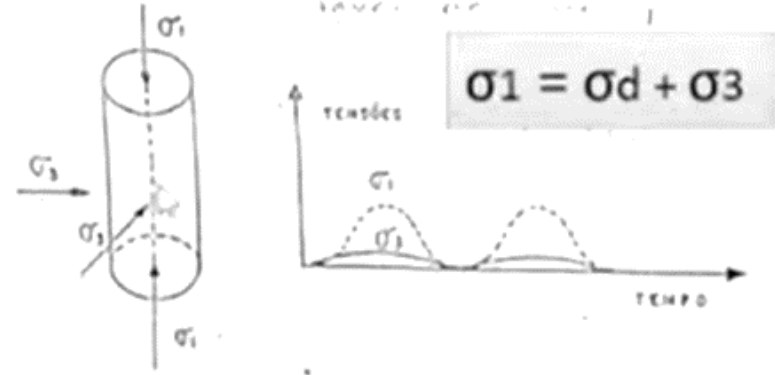


FIGURA 2.2 PRINCÍPIO DO ENSAIO TRIAXIAL  
 DUAL-AXIS ( $\sigma_3$  VARIÁVEL)

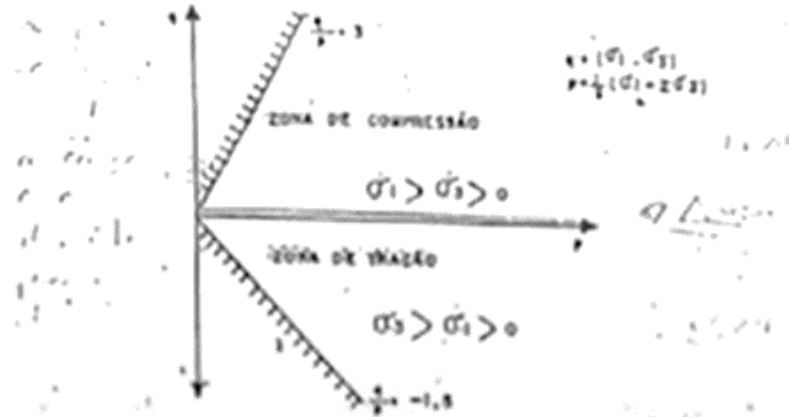
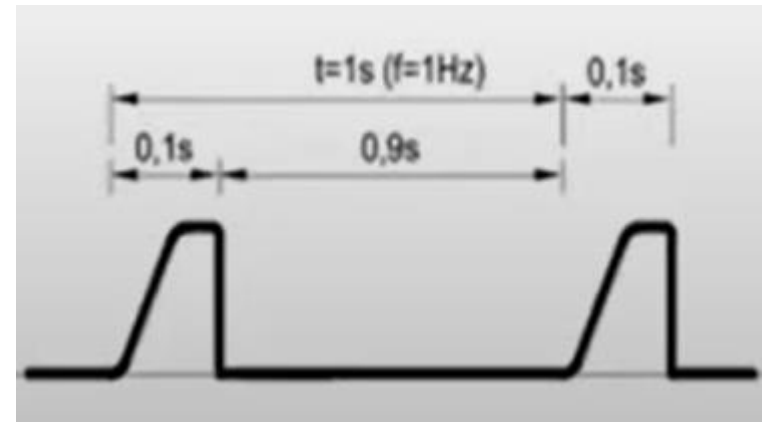
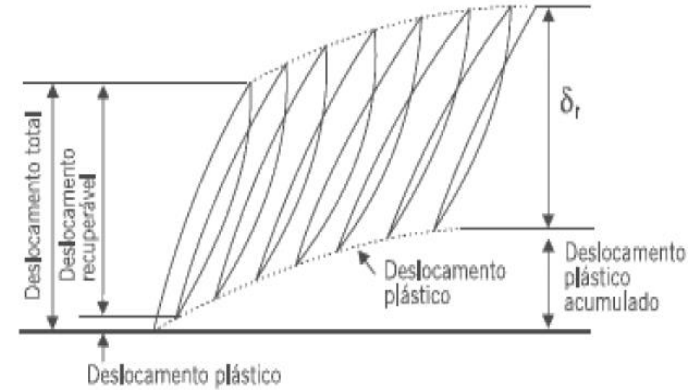
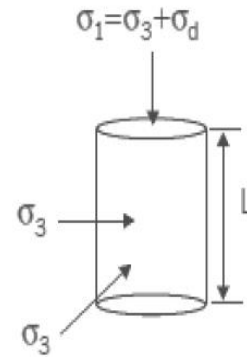
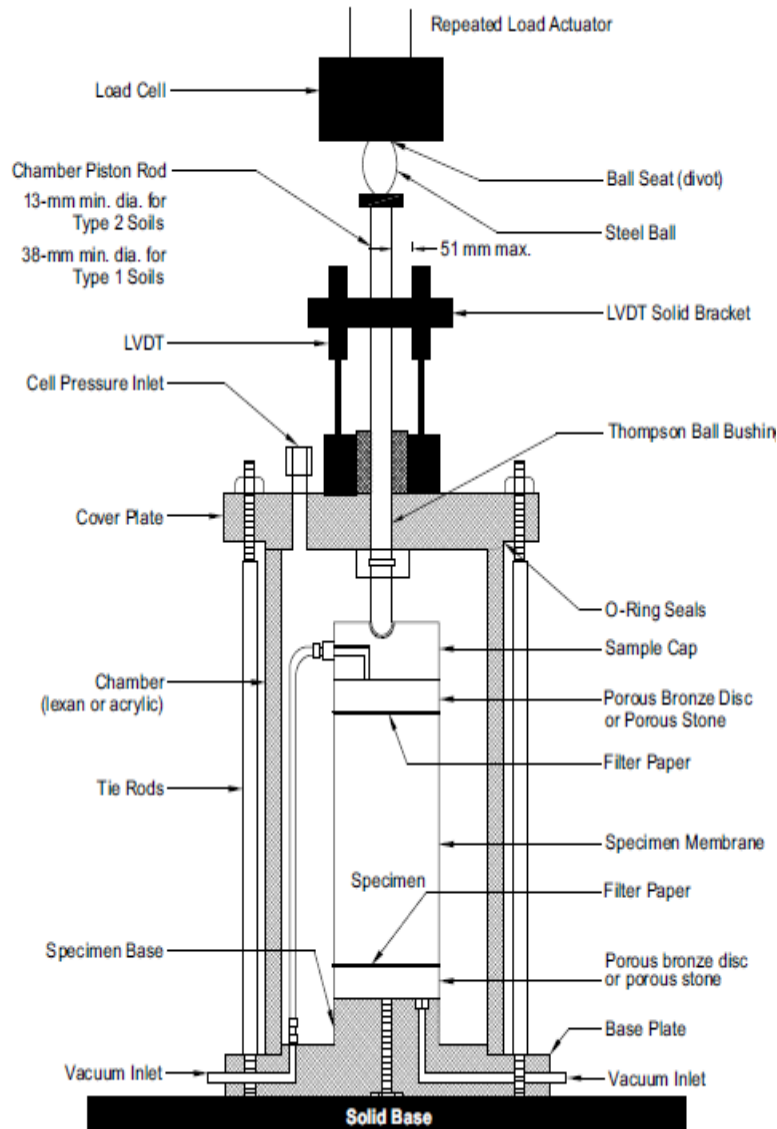
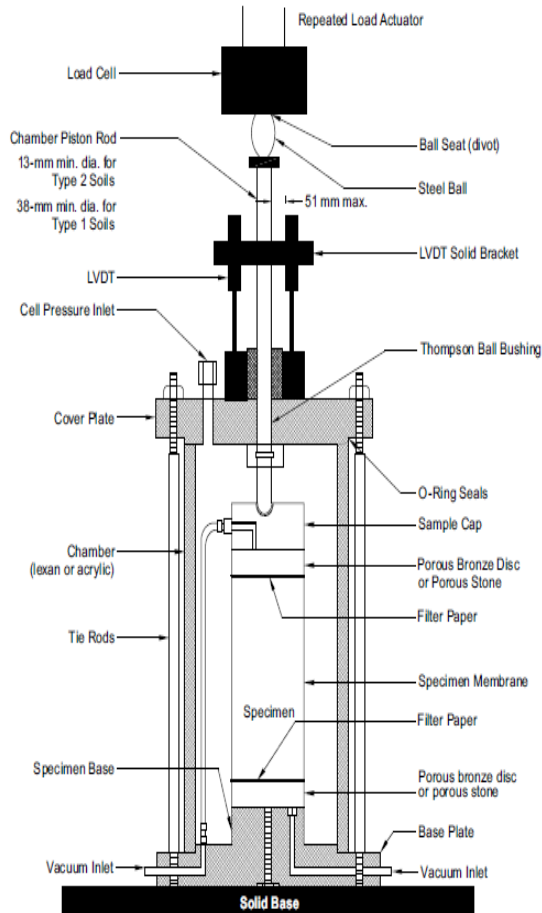


FIGURA 2.3 ESPAÇO DE TENSÕES  
 ADHESÍVEIS



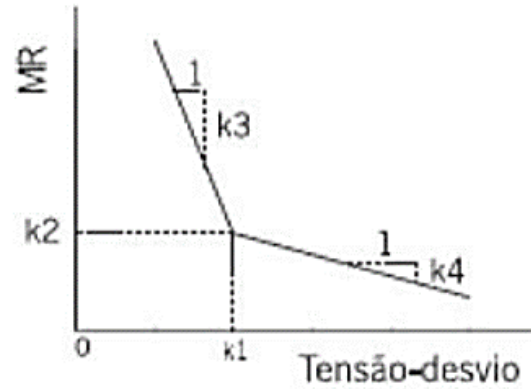
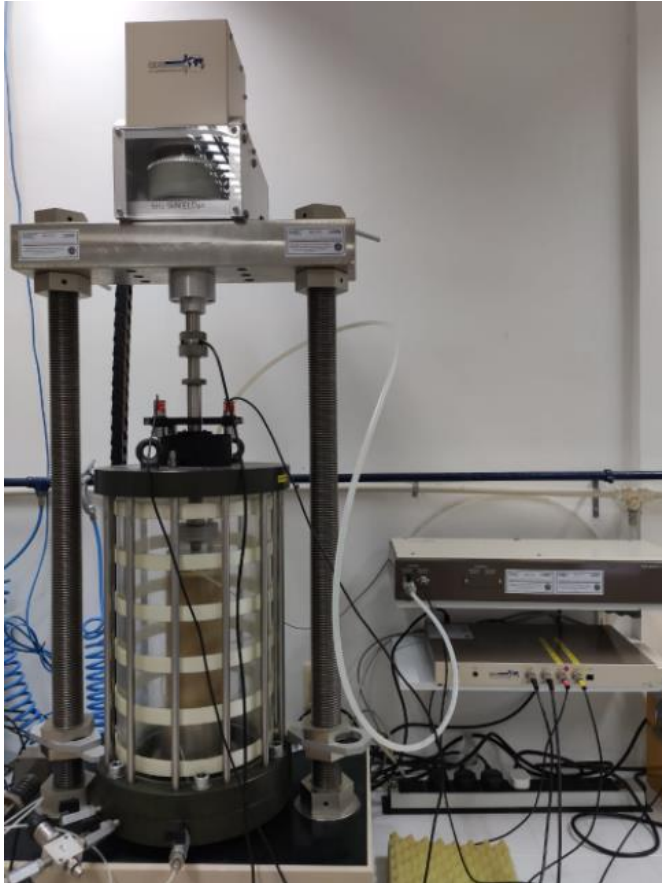




## 2.1. Ensayo Triaxial de cargas repetidas

- ❖ Deformabilidad elástica de suelos y agregados
- ❖ Especímenes cilíndricos compactados ensayados en cámara triaxial
- ❖ Materiales sujetos a la tensión de confinamiento  $\sigma_3$
- ❖ Se aplica una fuerza vertical de compresión repetidamente que genera una tensión desvío  $\sigma_D$
- ❖ Frecuencia y tiempo de carga : generalmente  $f = 1 \text{ Hz}$ ;  $T_{\text{carga}} \cong 0,1 \text{ s}$  (reproduce el efecto de carga a 60 km/h a una profundidad 40 cm)

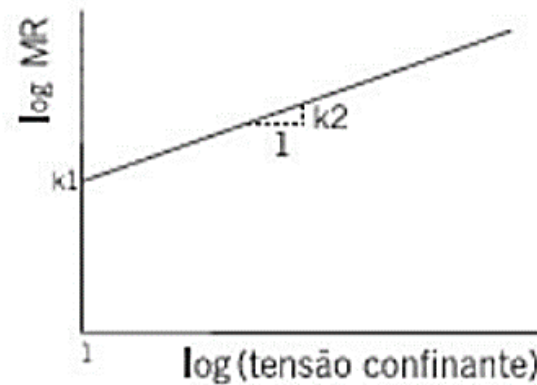
### 3. Caracterización de los materiales



Coesivo

$$MR = k2 + k3 \cdot |k1 - \sigma_d|$$

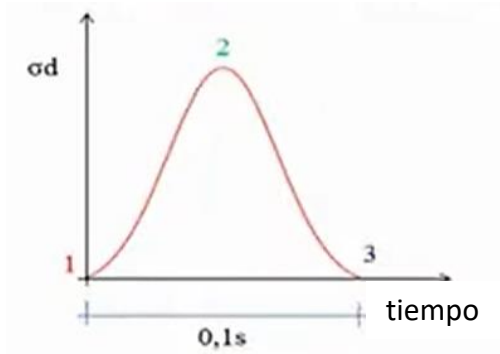
$$MR = k2 + k4 \cdot |k1 - \sigma_d|$$



Granular

$$MR = k1 \cdot \sigma_3^{k2}$$

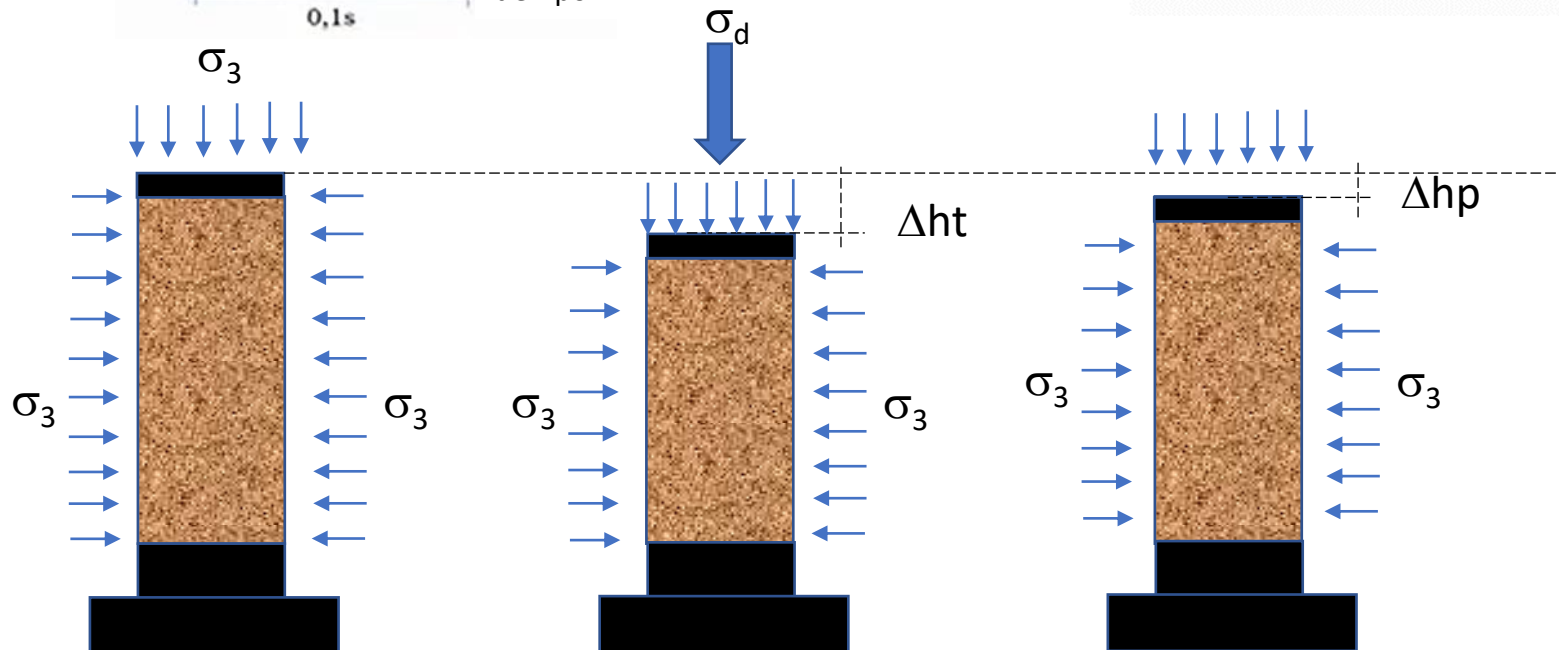
## 4. Ensayo triaxial Dinámico



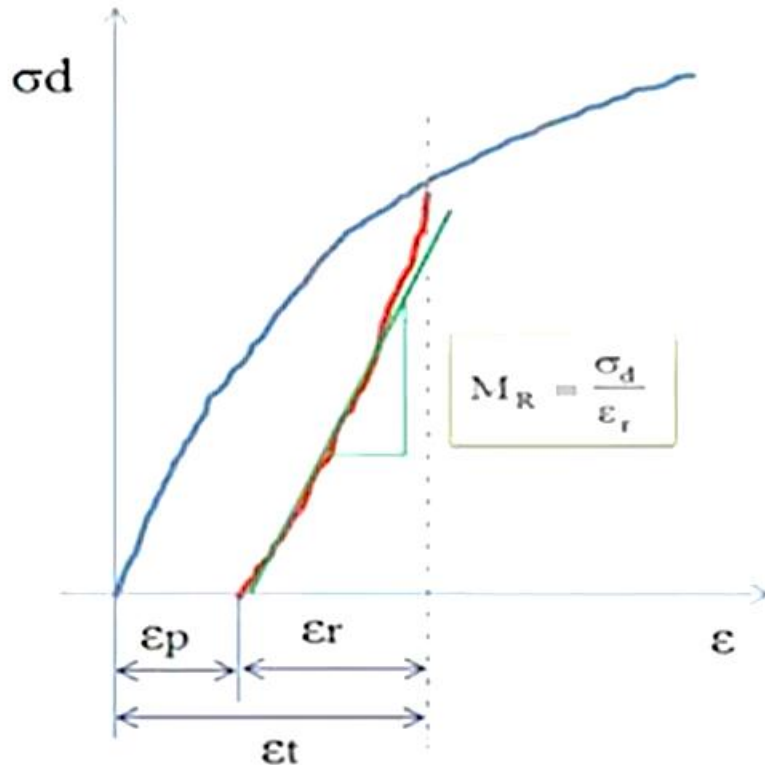
$$\Delta h_t = \Delta h_p + \Delta h_r$$

$$\Delta h_t / h_o = \Delta h_p / h_o + \Delta h_r / h_o$$

$$\epsilon_t = \epsilon_p + \epsilon_r$$



## 4. Ensayo triaxial Dinámico



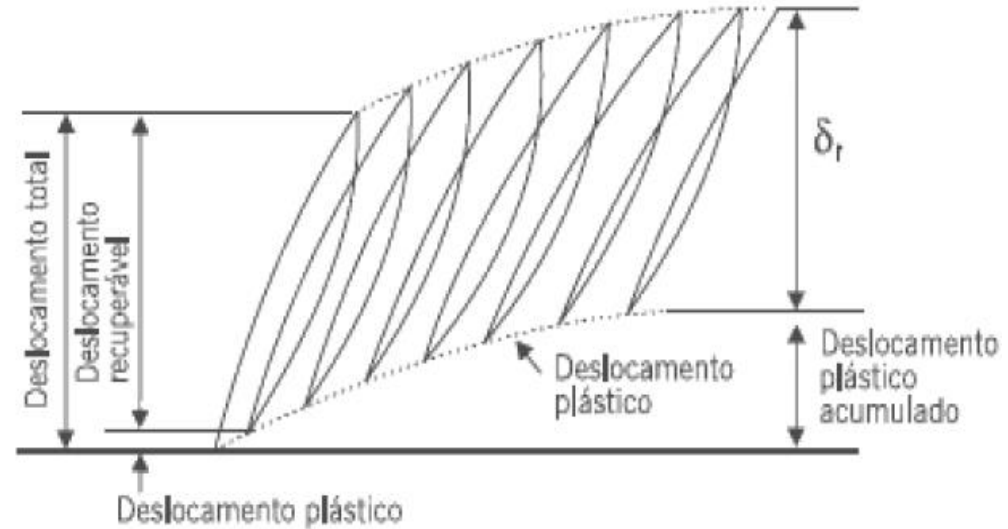
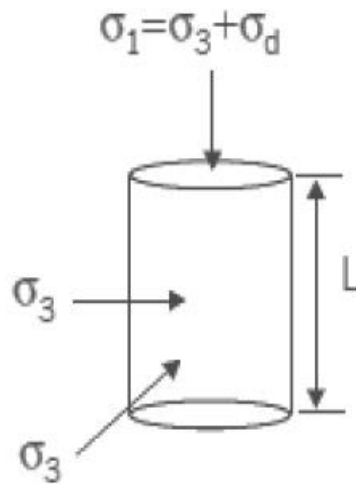
**MR : Módulo Resiliente del suelo para el estado De tensión aplicado**

**Cambia el estado de tensión → cambia la respuesta Del material, pues el solo no tiene comportamiento elástico**

$\epsilon_p$  – Deformación permanente → colabora para la deformación permanente de la estructura → Que es responsable de originar ahuellamiento en La estructura de pavimento;

$\epsilon_r$  – Deformación recuperable → colabora para la deformación recuperable de la estructura → Que es responsable por las fallas de fisuración por Fatiga del revestimiento asfáltico;

## 4. Ensayo triaxial Dinámico



$$MR = \sigma_d / \epsilon_r$$

Onde:

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 =$  tensão desvio aplicada repetidamente no eixo axial,

$\sigma_1 =$  tensão principal maior, MPa;

$\sigma_3 =$  tensão principal menor ou tensão de confinamento, MPa;

$\epsilon_r =$  deformação específica axial resiliente (recuperável), mm/mm;

Sendo:

$\epsilon_r = \delta_r / L$ , ou seja, deslocamento recuperável ( $\delta_r$ ) pela altura ou espessura ( $L$ ) do corpo-de-prova submetida às tensões.

## 5. Como hacemos los ensayos?

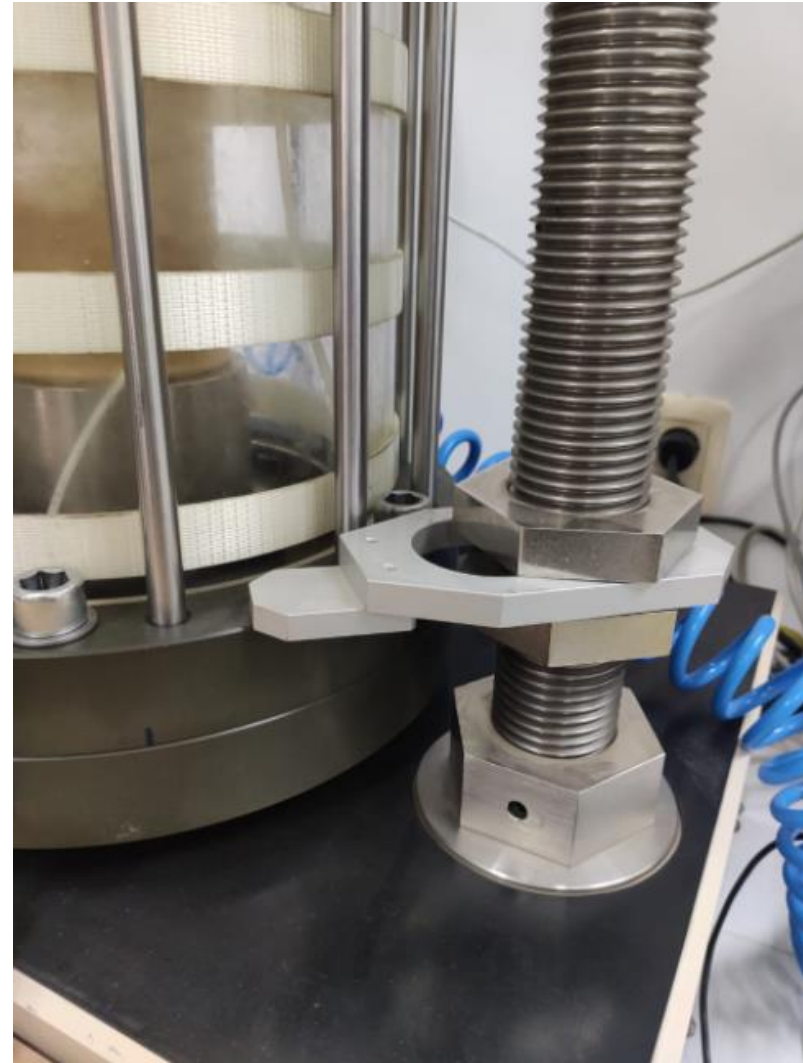
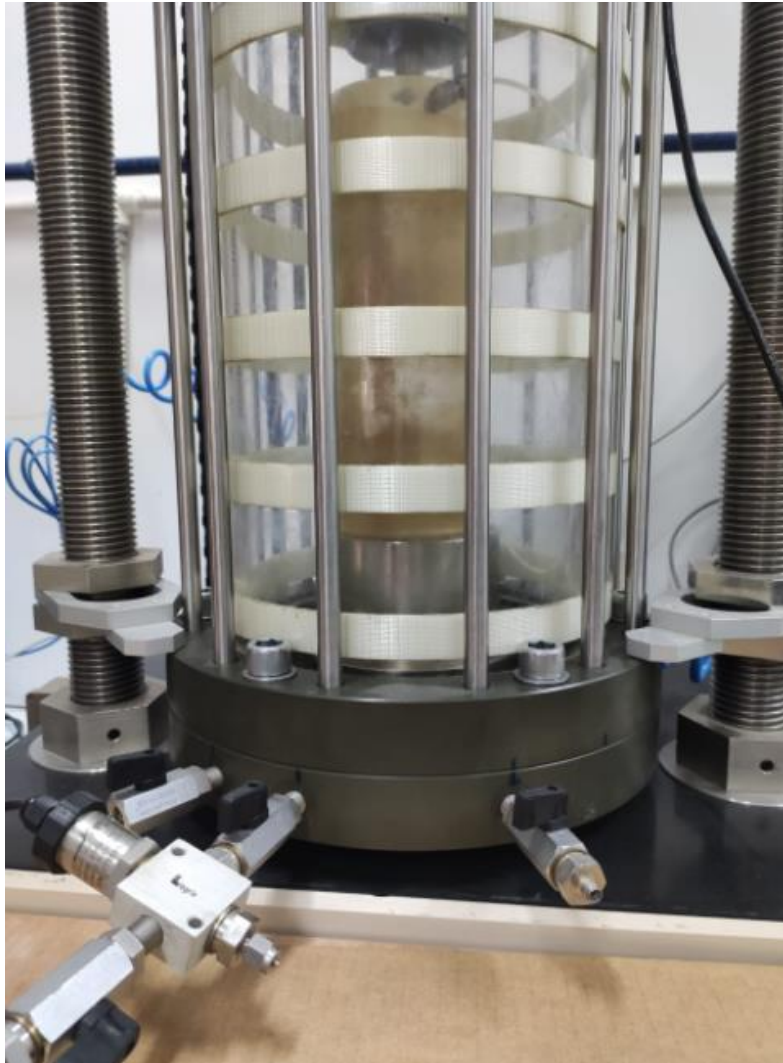


## 5. Como hacemos los ensayos?





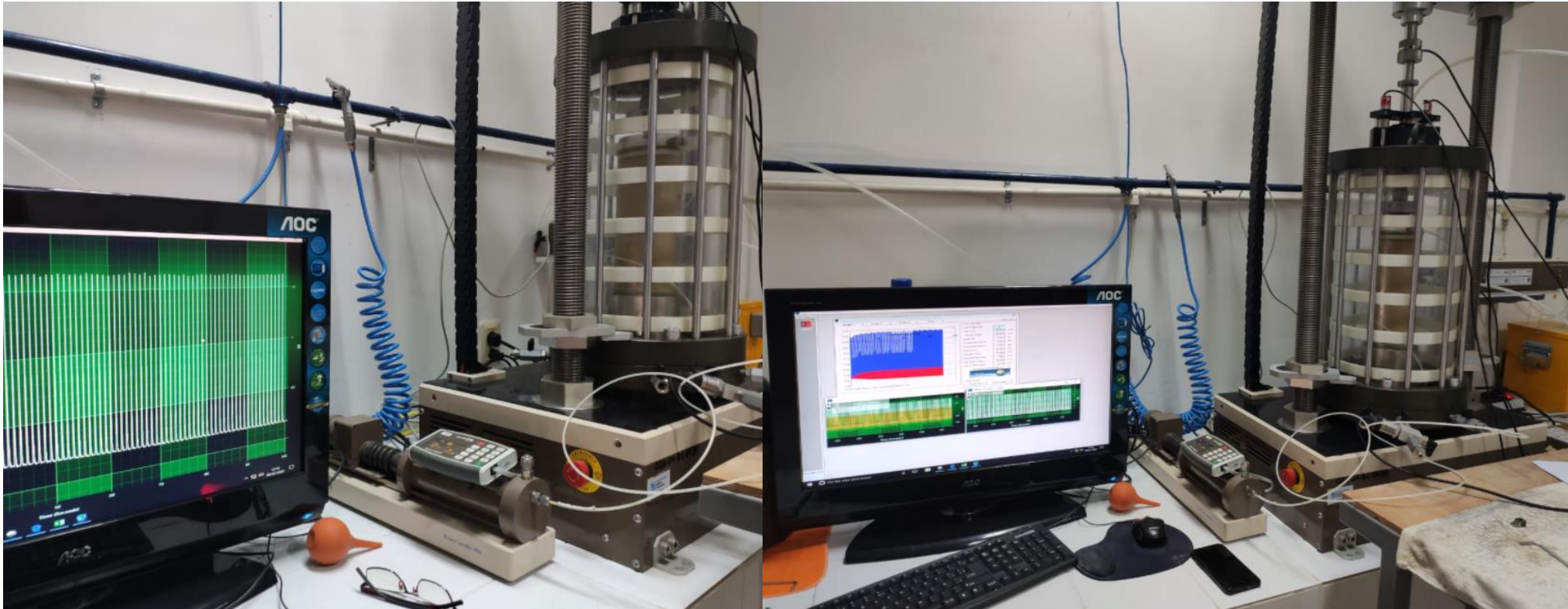
## 5. Como hacemos los ensayos?



## 5. Como hacemos los ensayos?



## 5. Como hacemos los ensayos?





## 5. Como hacemos los ensayos?

**Table 1**—Testing Sequence for Subgrade Soil

Sequence No.	Confining Pressure, $S_3$		Max. Axial Stress, $S_{max}$		Cyclic Stress, $S_{cyclic}$		Constant Stress, $0.1S_{max}$		No. of Load Applications
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
0	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	500–1000
1	41.4	6	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
2	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
3	41.4	6	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
4	41.4	6	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
5	41.4	6	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	27.6	4	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
7	27.6	4	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
8	27.6	4	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
9	27.6	4	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
10	27.6	4	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	13.8	2	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
12	13.8	2	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
13	13.8	2	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
14	13.8	2	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
15	13.8	2	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100

Note: Load sequences 14 and 15 are not to be used for materials designed as Type 1.

## 5. Como hacemos los ensayos?

**Table 2**—Testing Sequences for Base/Subbase Materials

Sequence No.	Confining Pressure, $S_3$		Max. Axial Stress, $S_{max}$		Cyclic Stress, $S_{cyclic}$		Constant Stress, $0.1S_{max}$		No. of Load Applications
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
0	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	500–1000
1	20.7	3	20.7	3	18.6	2.7	2.1	0.3	100
2	20.7	3	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
3	20.7	3	62.1	9	55.9	8.1	6.2	0.9	100
4	34.5	5	34.5	5	31.0	4.5	3.5	0.5	100
5	34.5	5	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	34.5	5	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
7	68.9	10	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
8	68.9	10	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
9	68.9	10	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
10	103.4	15	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
12	103.4	15	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
13	137.9	20	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
14	137.9	20	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
15	137.9	20	275.8	40	248.2	36.0	27.6	4.0	100

## 5. Como hacemos los ensayos?

Tiene que modelarse los resultados.

De esta forma, el ensayo genera un modelo de comportamiento del material. No se genera un valor único de modulo resiliente.

Stage	TIEMPO	Cell Pressure (kPa)	Desviator Stress (kPa)	MR (MPa)	q (MPa)	q/P <sub>atm</sub>	S <sub>d</sub> /S <sub>3</sub>	q/S <sub>3</sub>	Desviator Stress / Patm
1	99.08	47.55	12.05	45.26	0.107	1.05745297	0.25334222	2.253342219	0.118888946
2	99.08	47.55	24.52	69.62	0.120	1.18057076	0.51569573	2.515695727	0.242006729
3	95.08	46.85	37.00	72.50	0.131	1.28991883	0.78977642	2.789776416	0.365171726
4	99.08	46.52	49.40	72.63	0.142	1.4057683	1.06189754	3.061897539	0.487534898
5	99.08	46.49	61.60	72.64	0.155	1.52557237	1.32498645	3.324986447	0.607931112
6	95.08	46.51	12.16	49.56	0.105	1.03800815	0.26136693	2.261366934	0.11997213
7	99.08	30.88	24.66	59.83	0.086	0.85287078	0.79848225	2.798482247	0.243346971
8	95.08	29.06	37.04	62.75	0.095	0.93914612	1.27456919	3.274569191	0.365546318
9	99.08	29.14	49.39	65.47	0.108	1.06264821	1.69501819	3.695018189	0.487469332
10	95.08	30.09	61.71	66.42	0.122	1.20294747	2.05080269	4.050802688	0.609017053
11	99.08	19.52	12.25	45.43	0.051	0.50614522	0.62731376	2.627313758	0.120850378
12	95.08	16.18	24.60	51.32	0.057	0.56218497	1.52060519	3.520605191	0.2428166
13	99.08	16.25	36.93	54.84	0.069	0.68525203	2.27280995	4.272809952	0.364501966
14	95.08	16.20	49.16	57.45	0.082	0.80496407	3.03475213	5.034752134	0.485200933
15	99.08	16.16	61.36	59.36	0.094	0.92454314	3.79698847	5.796988471	0.60556954

## 6. Como modelamos?

### ❖ Suelos arenosos y materiales granulares

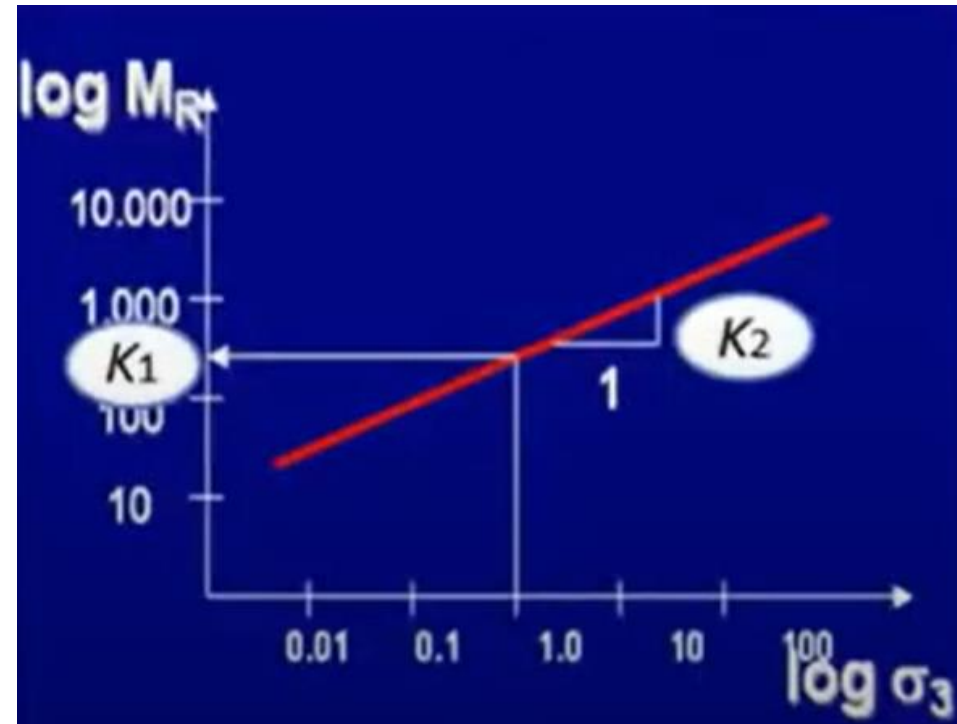
$$MR = f(\sigma_3)$$

El MR aumenta exponencialmente con  $\sigma_3$   
Entiéndase por suelos granulares, para fines de clasificación en cuanto a resiliencia, aquellos que suelos que presentan menos del 35% en peso de material pasando el tamiz N°200 (0.075mm)

### ❖ Modelo de Comportamiento:

$$MR = K_1 \times (\sigma_3)^{K_2}$$

Modelo de Hicks, 1970





## 6. Como modelamos?

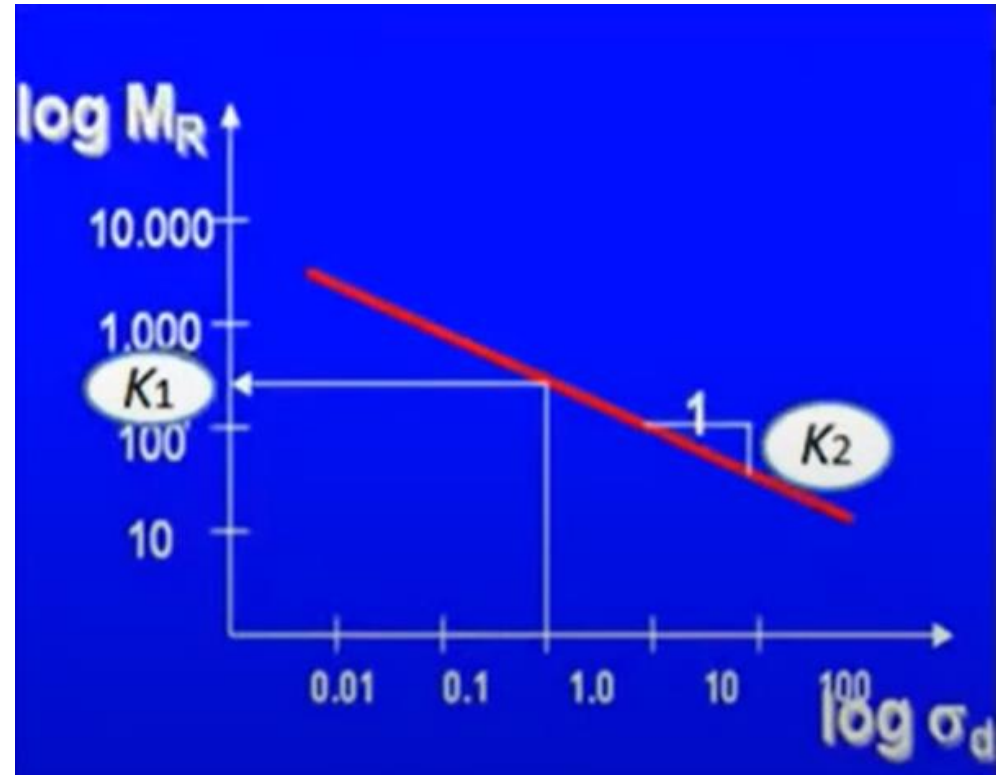
### ❖ Suelos cohesivos

$$MR = f(\sigma_D)$$

El MR disminuye exponencialmente con  $\sigma_d$  admitiéndose también un modelo bilineal

### ❖ Modelo de Comportamiento:

$$MR = K_1 \times (\sigma_d)^{K_2}$$

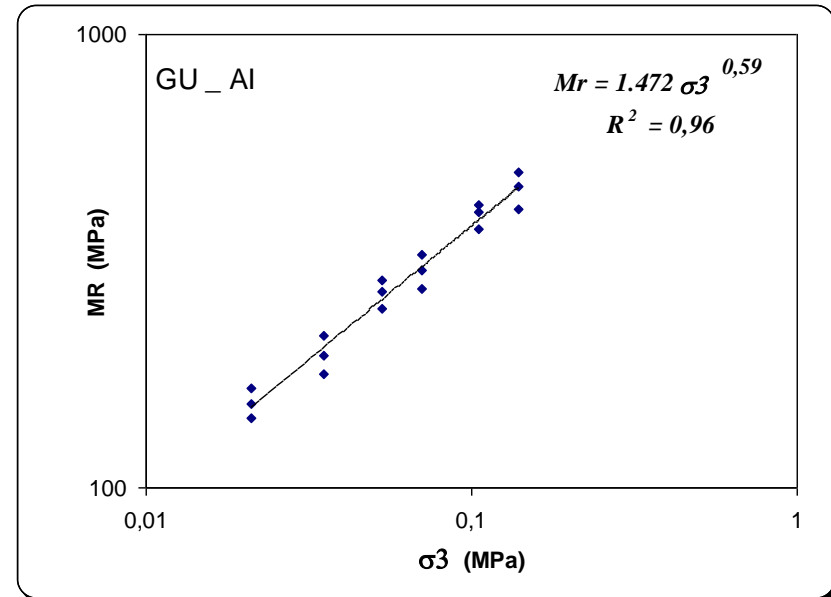


## 7. Factores que afectan la deformabilidad elástica de suelos granulares y agregados

❖ Estado de tensiones: es el factor de mayor importancia. Cuanto mayor la tensión de confinamiento o el primer invariante de tensiones mayor es el MR.

$$MR = K_1 x (\theta)^{K_2}$$

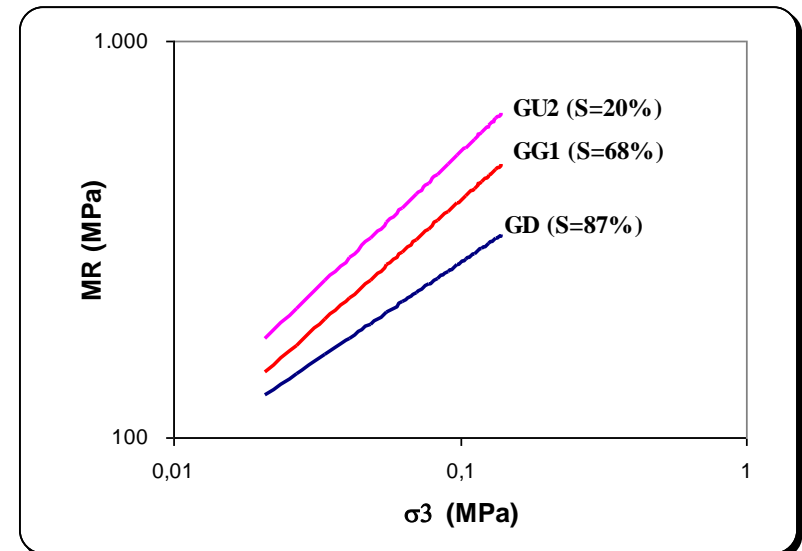
$$MR = K_1 x (\sigma_3)^{K_2}$$



## 7. Factores que afectan la deformabilidad elástica de suelos granulares y agregados

❖ Contenido de humedad: Es muy importante.

Aumento de la humedad puede reducir el MR a la mitad.



## 7. Factores que afectan la deformabilidad elástica de suelos granulares y agregados

- ❖ **Granulometría:** menor importancia; MR disminuye o aumenta con el porcentaje de finos (interacción con el porcentaje de humedad). Cuidado con Limos!
- ❖ **Energía de compactación:** MR crece con GC (deflexiones pueden ser usadas para evaluar a compactación)

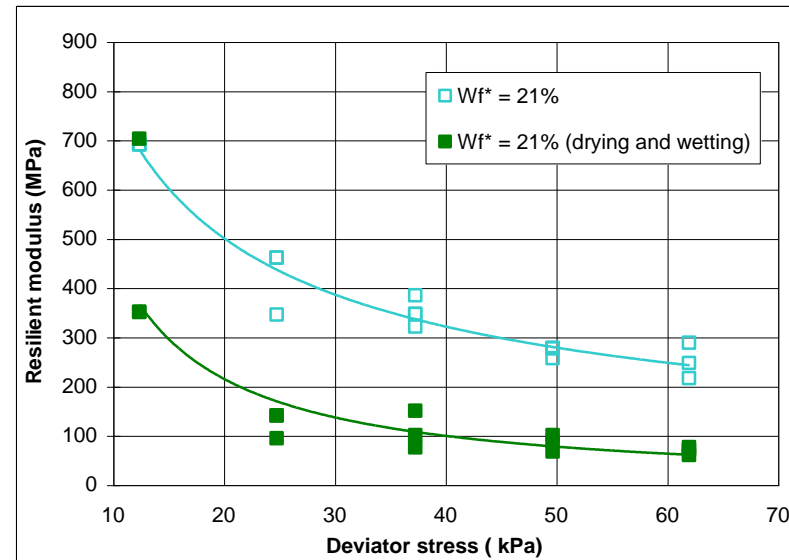
## 7. Factores que afectan la deformabilidad elástica de suelos cohesivos

- ❖ **Estado de tensiones:** es el + importante; en cuanto mayor  $\sigma_d$  tanto menor MR

### Modelo exponencial

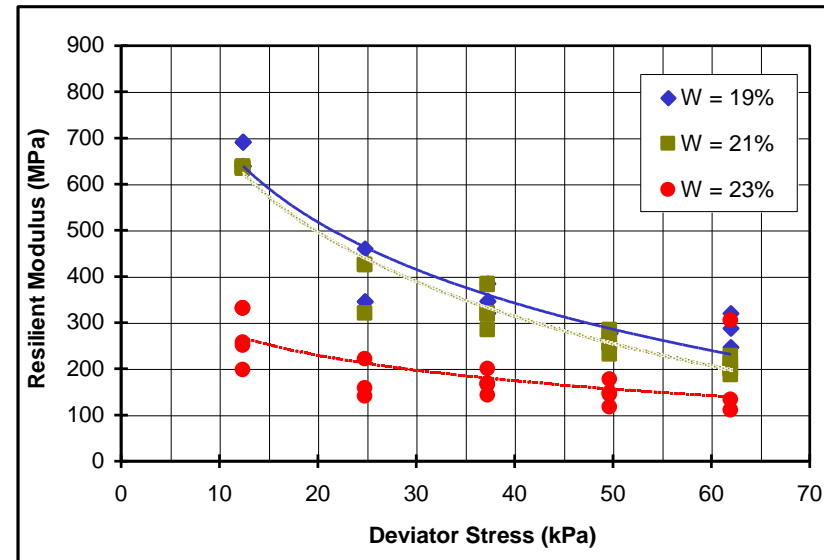
$$MR = k_1 \sigma_d^{k_2} \text{ siendo } k_2 < 0$$

Modelo bi-lineal identifica modificación del comportamiento (mayor deformabilidad inicial)

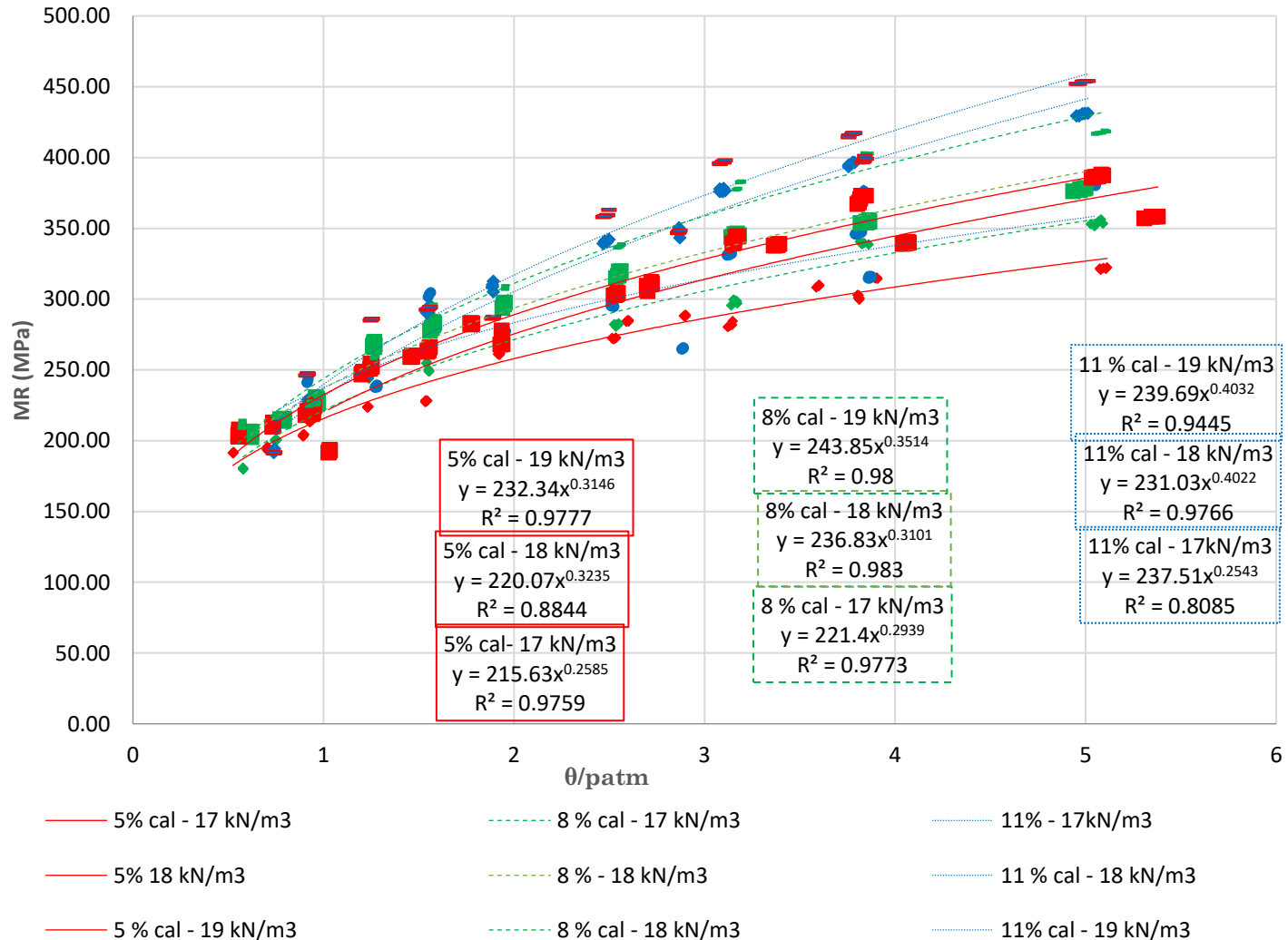


## 7. Factores que afectan la deformabilidad elástica de suelos cohesivos

- ❖ **Porcentaje de Humedad (saturación):** muy importante. MR disminuye con la saturación (Humedad).
- ❖ Suelos lateríticos bien compactados experimentan pequeñas variaciones de humedad; de la misma forma MR puede caer a la mitad (importancia del drenage!)



## 8. Algunas Investigaciones de FIUNA



## 8. Algunas Investigaciones de FIUNA

*En cuanto a la adición de cal:*

Se ha notado que ha mayor contenido de cal es mayor el módulo resiliente de las mezclas. Los valores varían en el rango de 200 MPa a 450 MPa para esfuerzos desviadores de entre 18 kPa a 250 kPa.

*En cuanto al peso específico aparente seco:*

Así mismo la densidad de las probetas se constituye en un factor fundamental, observándose crecimientos importantes en el módulo resiliente a medida que aumenta la densidad de las mismas.



## Comentarios Finales

El ensayo de CBR ha sido muy utilizado en el medio de carreteras debido a su extensa difusión. **En este sentido, (AASHTO, 1993) recomienda sustituir el ensayo de CBR por el ensayo triaxial cíclico para obtener el Módulo de Resiliencia (MR), para caracterizar los materiales utilizados en la construcción de pavimentos.**

El Modulo resiliente depende de factores como humedad, tipo de material, grado de compactación y energía de compactación.

**Muchas Gracias**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE ASUNCIÓN  
**FACULTAD DE  
INGENIERÍA**



**PROCIENCIA**

PROGRAMA PARAGUAYO PARA EL DESARROLLO DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA