

# SEMINARIO SOBRE GEOTECNIA FERROVIARIA



## Balasto de líneas de ferrocarril: Características Mecánicas

María SANTANA RUIZ DE ARBULO



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD  
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO


**CEDEX**  
CENTRO DE ESTUDIOS  
Y EXPERIMENTACIÓN  
DE OBRAS PÚBLICAS



AGENDA  
**2030**



# ÍNDICE

- 
- 1 – Balasto, qué es**
  - 2 – Funciones del balasto**
  - 3 – Normalización del balasto**
  - 4 – Ensayos realizados por el CEDEX en balasto**
    - a) Corte directo de grandes dimensiones (1x1m)
    - b) Corte directo en caja de 30 x 30 cm
    - c) Resistencia superficie Traviesa-Balasto
    - d) Triaxial de 9"
    - e) Triaxial dinámico
    - f) Permeabilidad
  - 6 – Resumen**



# 1. BALASTO – QUÉ ES

## balasto

Del ingl. *ballast* 'lastre<sup>1</sup>'.

### Artículo

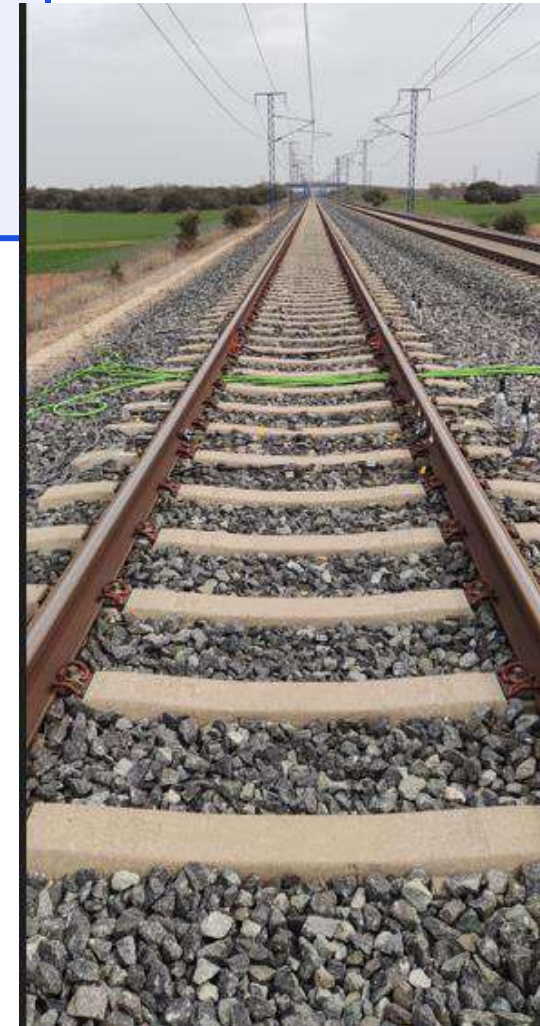
Sinónimos o afines

1. m. Capa de grava o de piedra machacada, que se tiende sobre la plataforma de las vías férreas para asentar y sujetar sobre ella las traviesas, o sobre la explanación de las carreteras para colocar encima el pavimento.

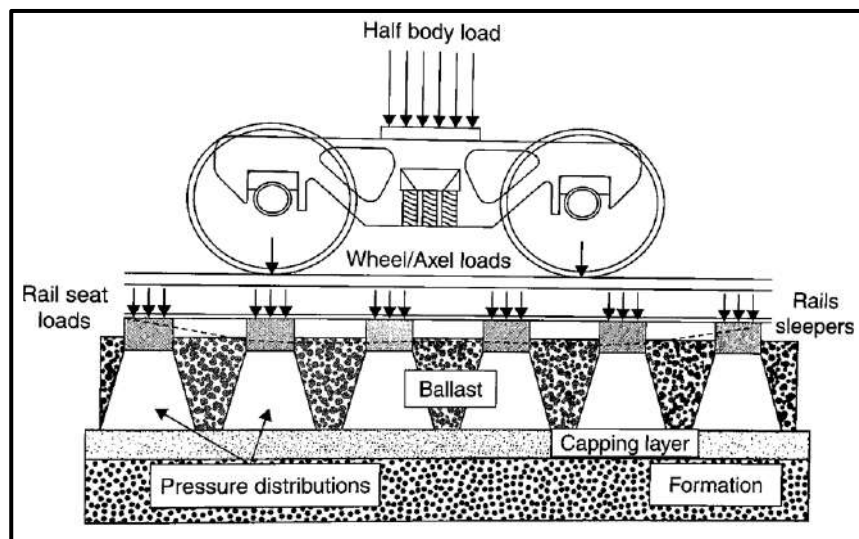
SIN.: balastro, grava, guijo, cascajo, casquijo.



**balastro.** (Var. de *balasto*). m. Mezcla rojiza de arena, arcilla y fragmentos pequeños de cuarzo; se encuentra en yacimientos más o menos superficiales y se emplea en la construcción de carreteras, caminos y el afirmado de terrenos transitados. ♦ **granza**; **pedregullo**.



## 2. FUNCIONES DEL BALASTO



Función	Propiedad
Proporcionar rigidez a la vía frente a las fuerzas horizontales, verticales y longitudinales producidas por el paso de trenes	<b><i>Resistencia al corte</i></b>
Permitir libre drenaje del agua de lluvia	<b><i>Permeabilidad</i></b>
Disipar cargas dinámicas	<b><i>Amortiguamiento</i></b>
Permitir mantenimiento de alineación y nivelación de la vía	<b><i>Compactación</i></b>
Disponer de suficiente porosidad para almacenar material fino	<b><i>Uniformidad granulométrica</i></b>



# 3. NORMALIZACIÓN DEL BALASTO

norma española		UNE-EN 13450
		Diciembre 2003
TÍTULO	Áridos para balasto	



ÍNDICE		Página
ANTECEDENTES .....		5
1	OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	6
2	NORMAS PARA CONSULTA.....	6
3	TÉRMINOS Y DEFINICIONES .....	7
4	MUESTREO.....	7
5	PRODUCCIÓN .....	7
6	REQUISITOS GEOMÉTRICOS .....	8
7	REQUISITOS FÍSICOS .....	10
8	COMPONENTES NOCIVOS .....	12
9	EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD .....	12
10	DENOMINACIÓN Y DESCRIPCIÓN .....	13
11	IDENTIFICACIÓN Y ETIQUETADO.....	13

## Otros documentos normativos

- N.A.V. 2-1-0.1 Obras de tierra. Capas de asiento ferroviarias (febrero 1982)
- NAV 3-4-1.0 Balasto. Dimensionamiento de la banqueta (Julio 1985)
- NAV 0-2-0.0 Parámetros geométricos (Enero 1998)
- NAV 3-4-3.0 Montaje de vía en balasto para obra nueva (Julio 2015)
- IF-3 Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal (Julio 2015)
- NAP 1-2-1.0 Metodología para el diseño del trazado ferroviario (Enero 2021)
- UIC 719 e IRS 70719
- AREMA

**Balasto.-** Árido machacado

**Balasto Natural.-** Origen mineral

**Balasto Artificial.-** De proceso industrial

**Balasto Reciclado.-** Tratamiento de balasto previamente utilizado

MINISTERIO DE FOMENTO

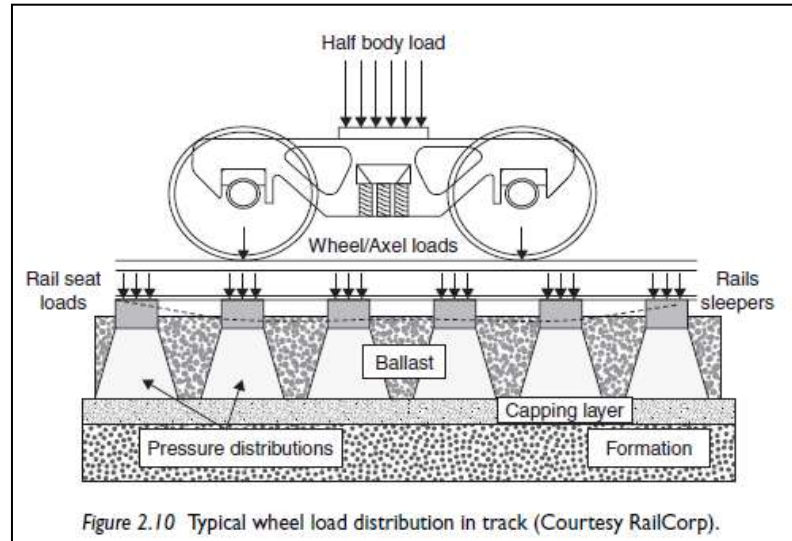
**7735**    *ORDEN FOM/1269/2006, de 17 de abril, por la que se aprueban los Capítulos: 6.-Balasto y 7.-Subbalasto del pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios (PF).*

Ensayo	Norma	Valores
Granulometría	EN 933-1	63-22,4 mm
Índice de forma	EN 933-4	No cúbicas ≤10%
Longitud máxima		>100 mm, ≤4%
Desgaste Los Ángeles	EN 1097-2	≤14%
Absorción	EN 1097-1	≤0,5%
Sulfato magnésico	EN 1367-2	≤4%
Sonnenbrand	EN 1367-3	≤5%

## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO

**Objetivo principal del balasto soportar:**

**Cargas Verticales**



**Cargas Horizontales**

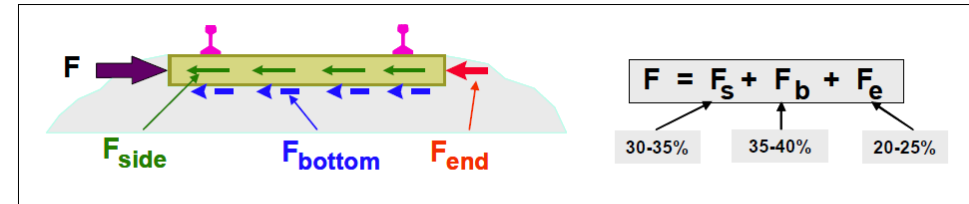


Figure 4 – Lateral Resistance Components

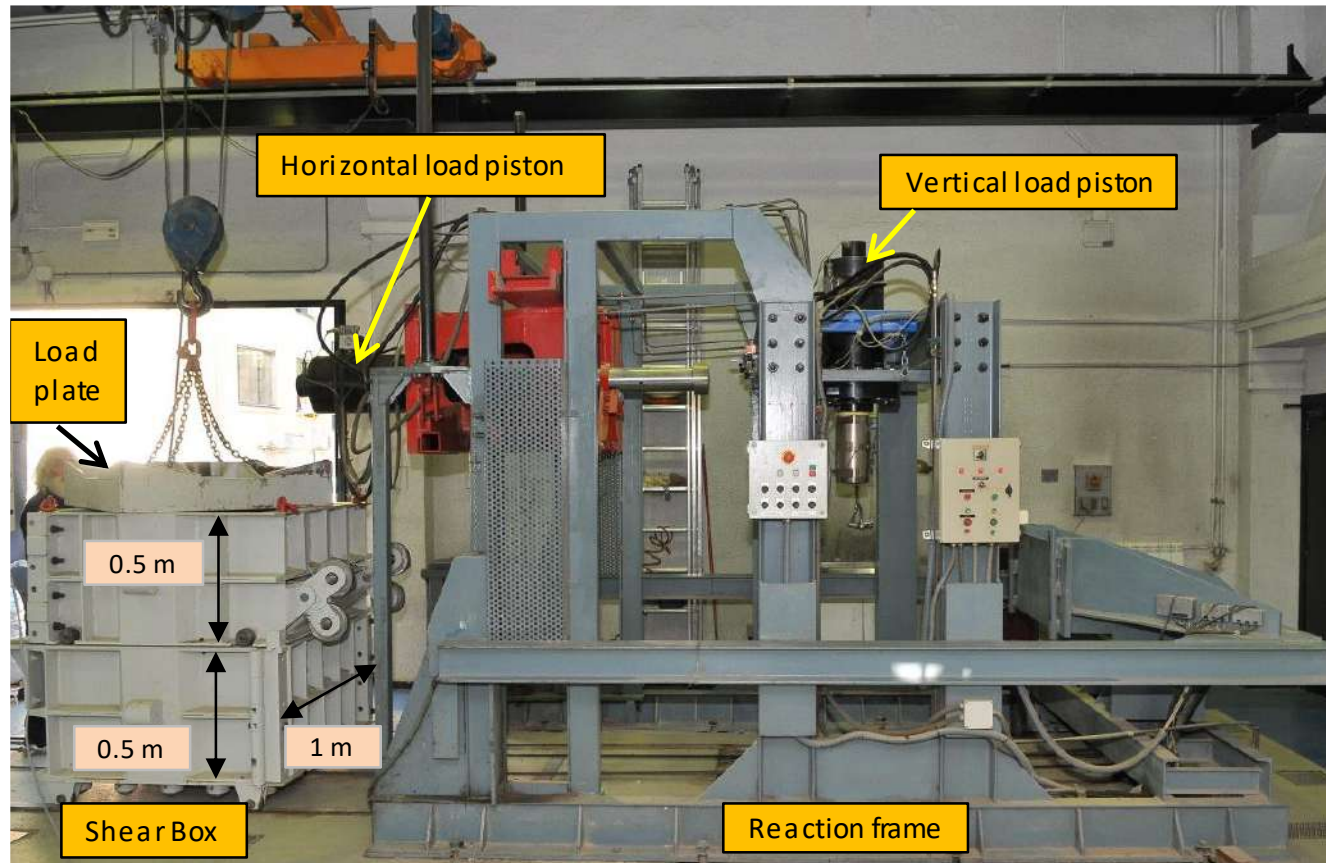
**Parámetro de control: Resistencia**



**Ensayos de corte directo**  
**Ensayos triaxiales**

## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

### a) Caja de corte de Grandes Dimensiones - Descripción



#### **Geometrical characteristics**

- Box height: 1.0 m
- Shearing plane dimensions: 1 X 1 m

#### **Mechanical characteristics**

- Max. load: 1000 kN
- Max. horizontal displacmt.: 25 cm
- Displcmt. speed: 0.45-45 mm/min  
(for present study: 1 mm/min)



# 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

## b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

### I- Tipo balasto

PAV 3-4-0.0
BALASTO
PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARA EL SUMINISTRO Y UTILIZACIÓN DEL BALASTO
7ª EDICIÓN: Enero de 2007

Las rocas para extracción del balasto serán de naturaleza silíceas y, preferentemente, de origen ígneo o metamórfico. Por tanto no se admitirán las de naturaleza caliza ni dolomítica.

### 2- Densidad banqueta

No definida por ADIF  
Valor habitual: 1,55 t/m³

Test	Material	Specimen preparation	Normal stress (kPa)	Specimen unit weight (kN/m³)
1	Mylonite	Dropping the material <sup>I</sup>	49 – 98 – 196	13.5 – 14.2
2	Andesite	Dropping the material <sup>I</sup>	10 – 25 – 49 – 98 – 147 – 196 – 294 – 392	13.0 – 14.0
3	Mylonite	Light compaction <sup>II</sup>	30 – 73 – 147	15.7 – 15.9
4	Andesite	Light compaction <sup>II</sup>	49 – 98 – 196	14.6 – 14.9

- 20 specimens tested
- 2 types of material: mylonite and andesite
- Dry conditions
- Dropped and compacted
- Normal stress: 10 kPa to 400 kPa



Normal stress (kPa)	Equivalent situation
10	35 cm of ballast layer
100	Static load of passenger train
200	Dynamic load of freight train

To check repeatability

## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

### b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

#### Aspecto del balasto



**Mylonite**



**Andesite**



## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

### b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

Preparación del ensayo: Vertido vs Compactado

#### Vertido

Unit weight: 13.5 – 14 kN/m<sup>3</sup>



#### Compactado

- 5 layers
- Manual dynamic compactor
- Unit weight: 14.5 – 16 kN/m<sup>3</sup>

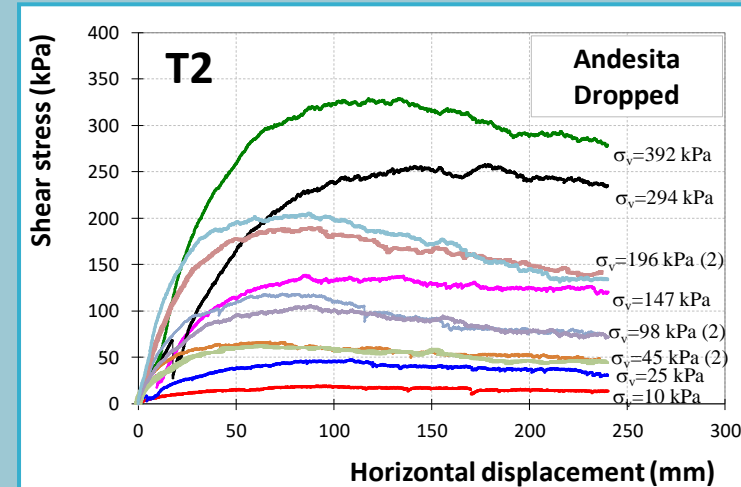
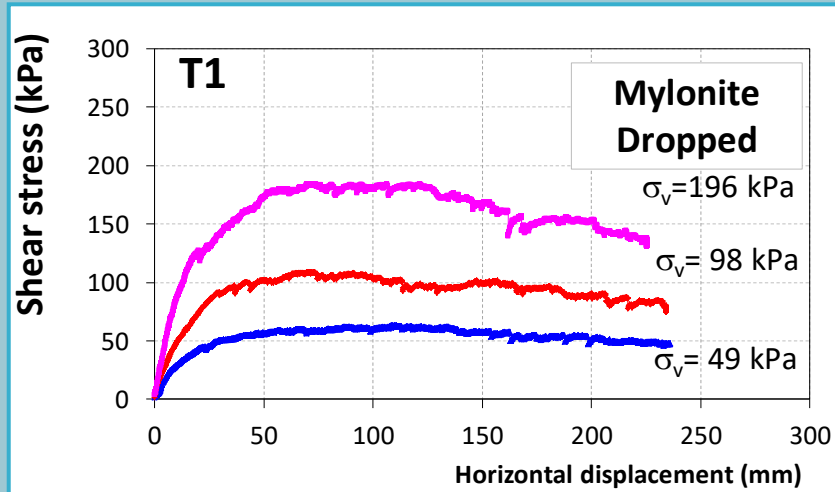


## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

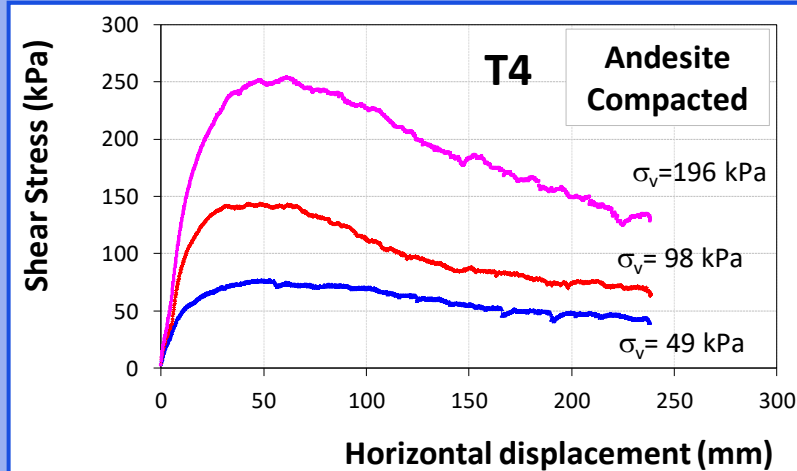
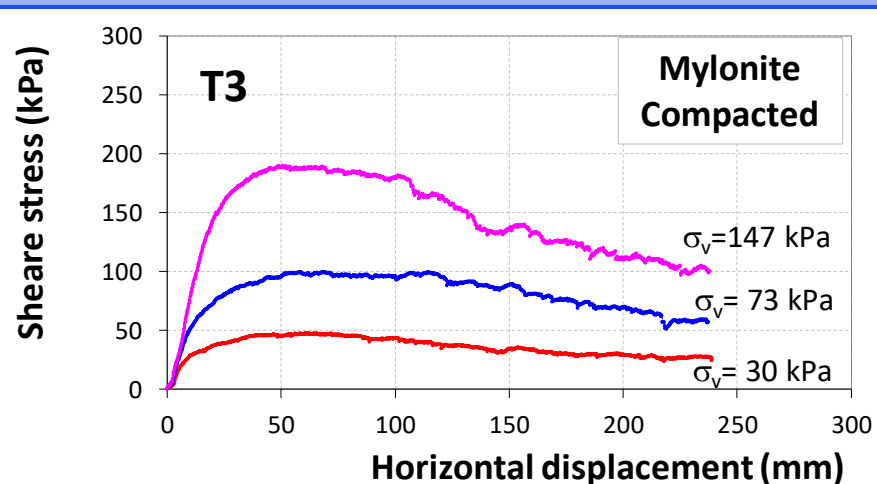
### b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

#### Resultados: Curvas Tensión-Deformación

#### - Dropped ballast



#### - Compacted ballast

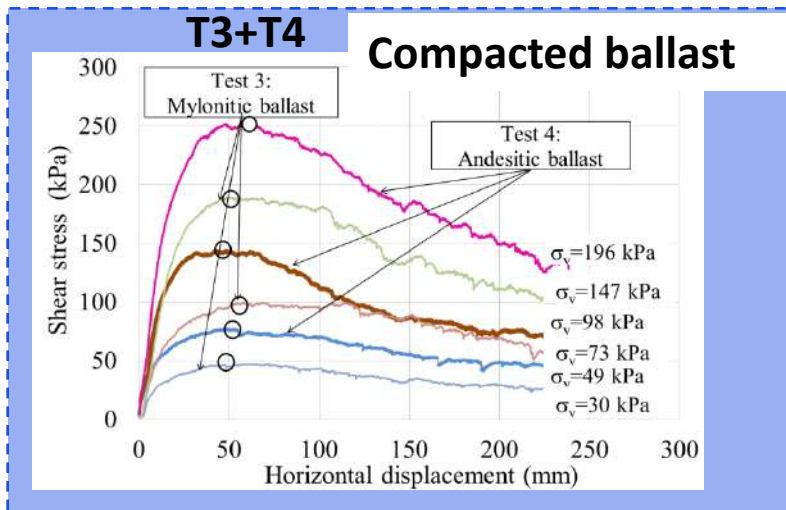
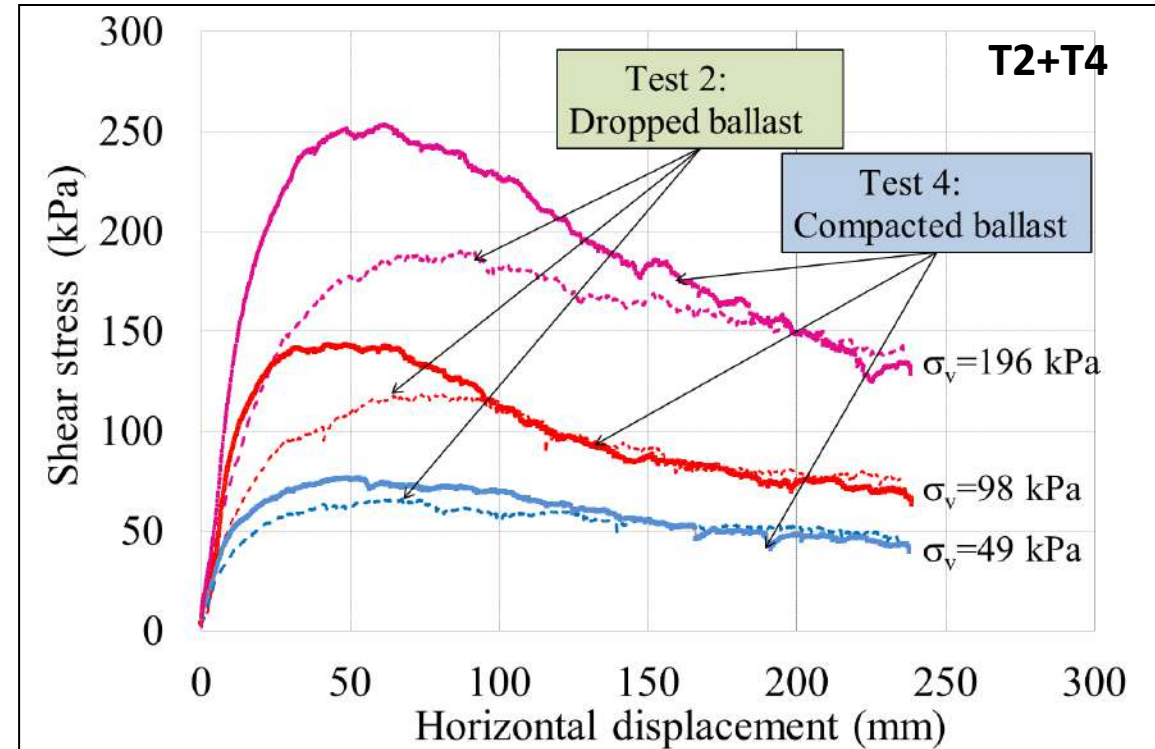
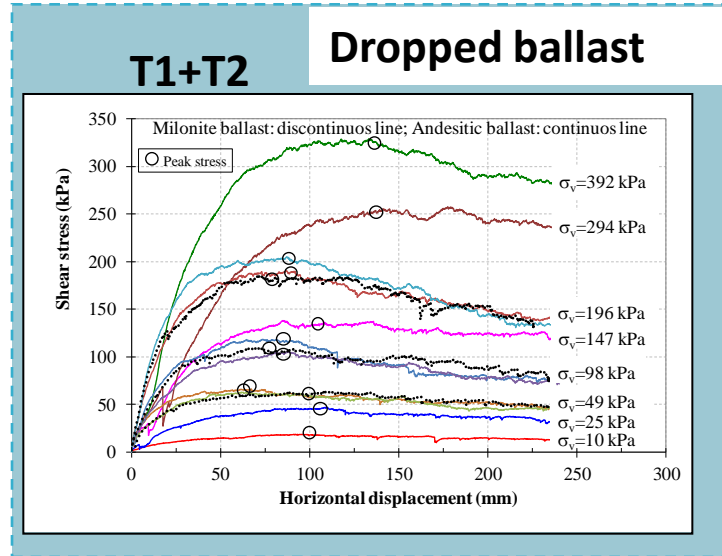




## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

### b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

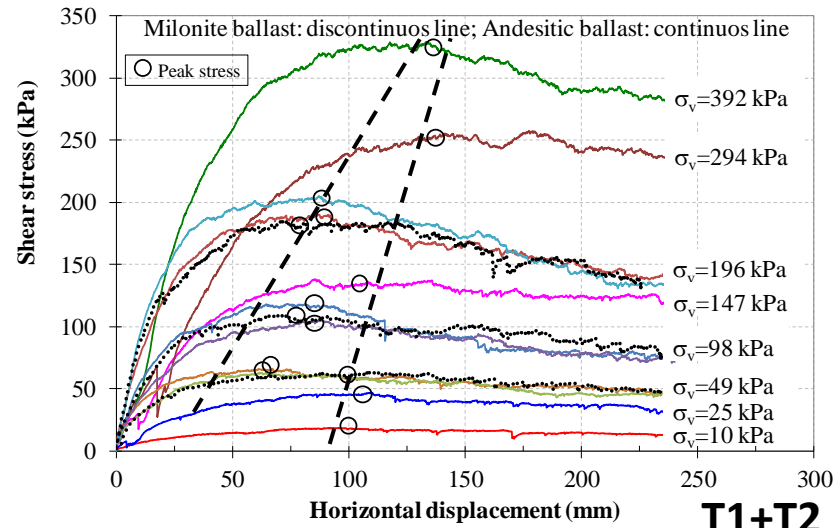
#### Resultados: Comparación vertido vs compactado



## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

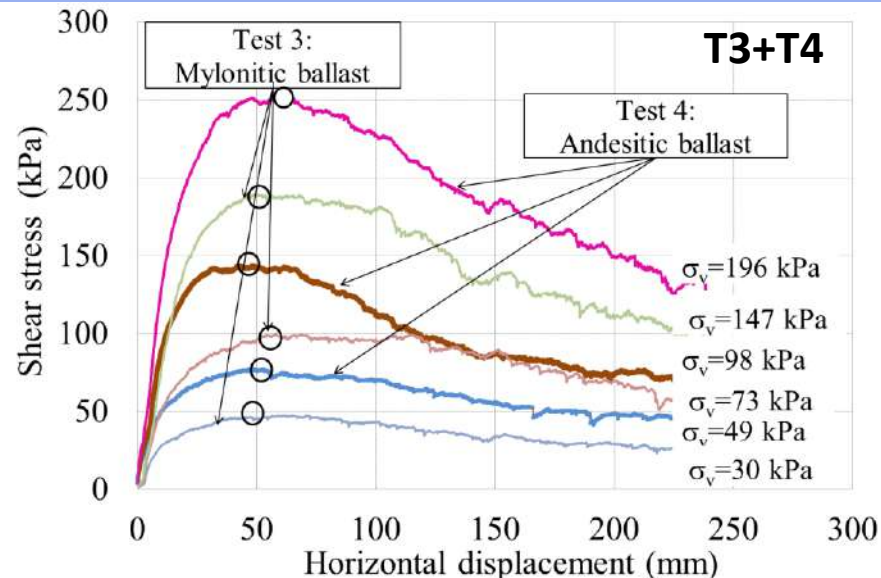
### b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

#### Resultados: Desplazamiento del pico de Resistencia de tension tangencial



#### Balasto vertido

- Peak stress horizontal displacement seems to increase with normal stress
- $\tau$  (great displacm) /  $\tau$  (peak) = 0.65-0.90



#### Balasto compactado

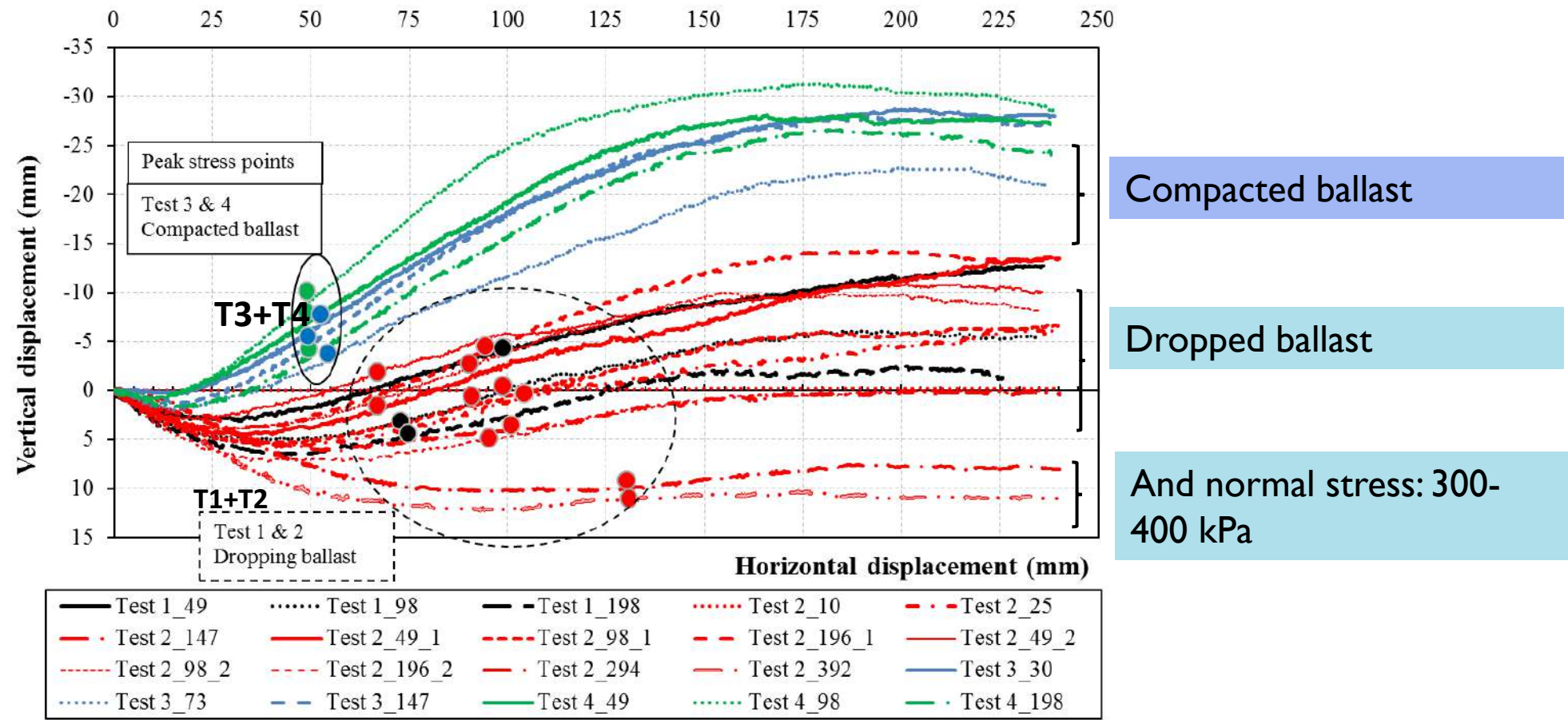
- $\tau$  (great displacm) /  $\tau$  (peak) = 0.50-0.60



4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

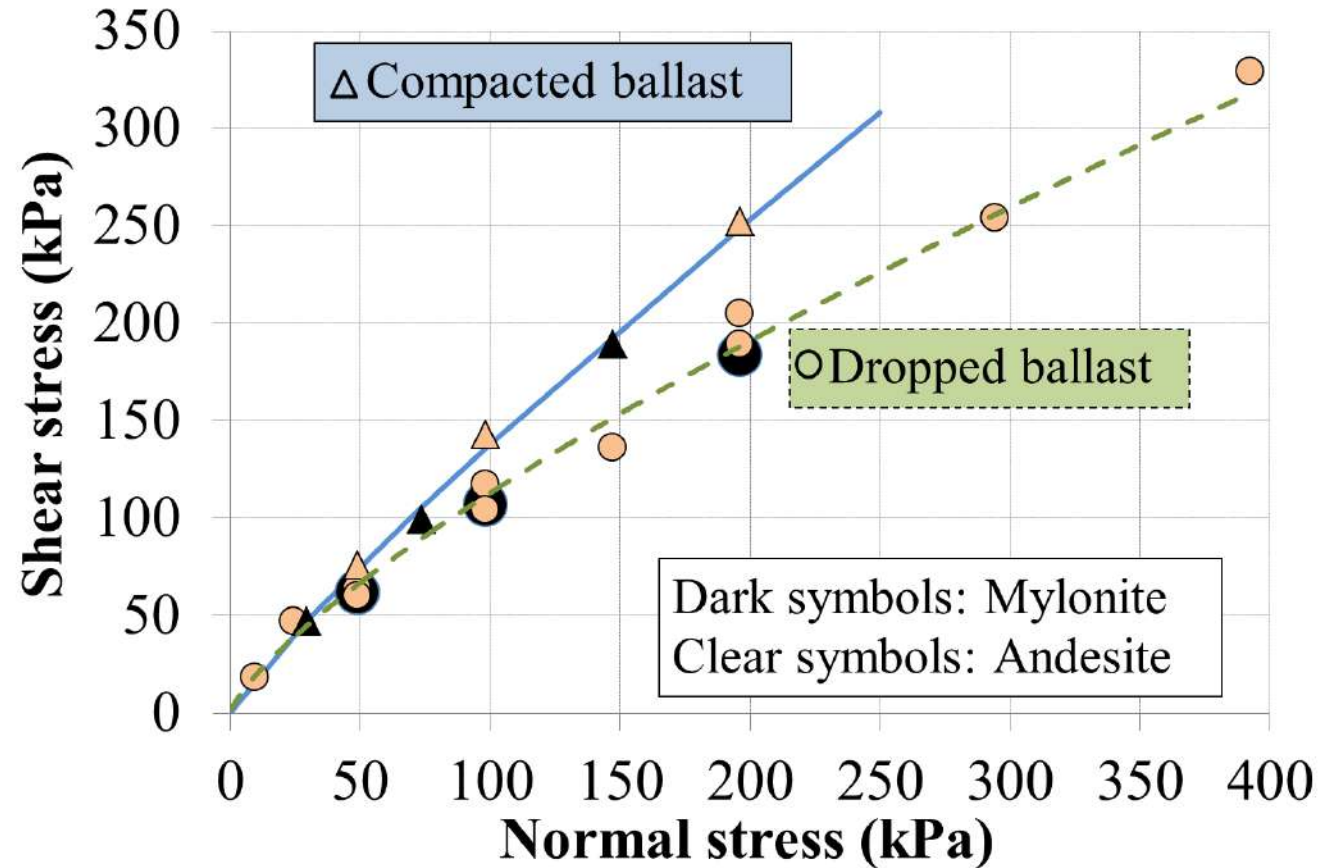
Resultados: Dilatancia



## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

### b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

#### Resultados: Curva de rotura



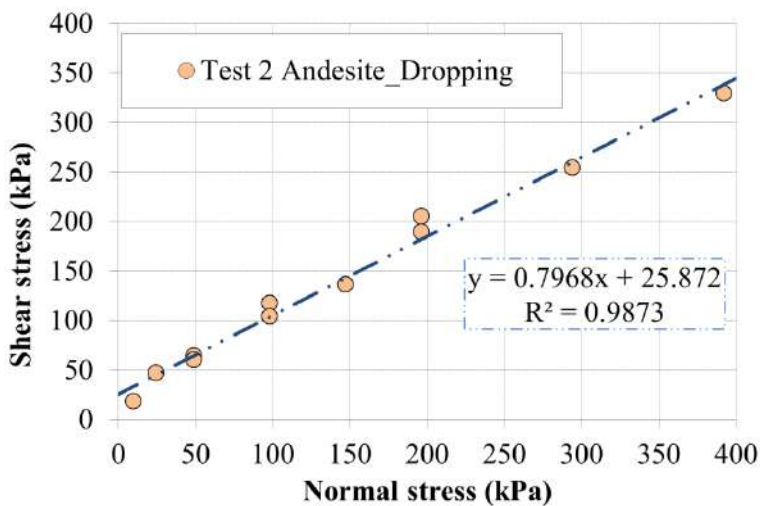
- **Non-linear envelopes**
- Similar trend for both types of ballast
- Greater values for compacted specimens
- The difference increases at higher normal stresses



4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

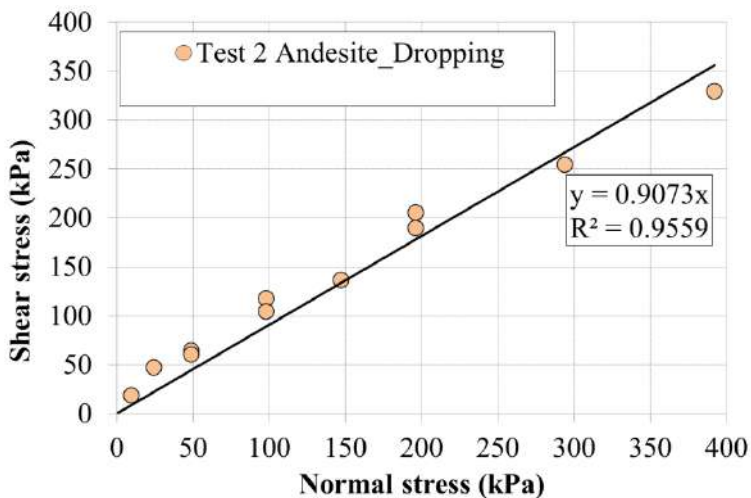
b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

Resultados: Diferentes Criterios de Rotura



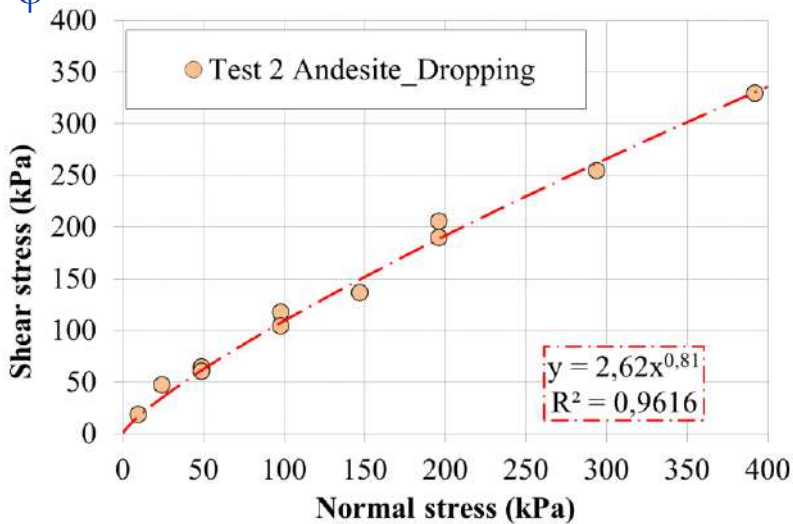
**Mohr-Coulomb with cohesion**

$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi$



**Mohr-Coulomb without cohesion**

$\tau = \sigma_n \tan \varphi$



**Parabolic model**

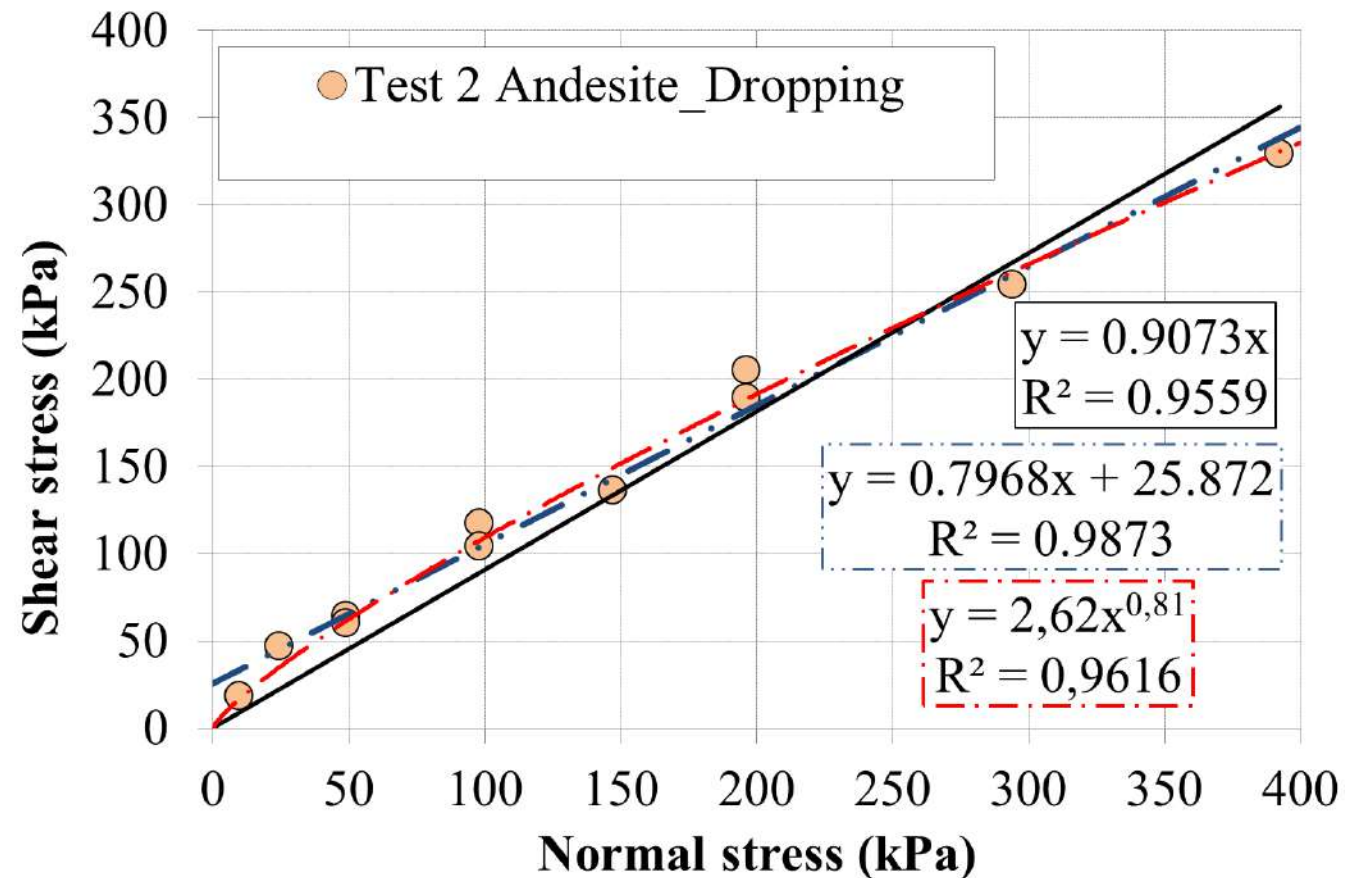
$\tau = a \sigma_n^b$

## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

### b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

### Resultados: Diferentes Criterios de Rotura

- **Mohr-Coulomb with cohesion:**  $\tau = c + \sigma_n \tan \varphi$
- **Mohr-Coulomb without cohesion :**  $\tau = \sigma_n \tan \varphi$
- **Parabolic model:**  $\tau = a \sigma_n^b$





# 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

## b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

### Resultados: Criterio de Rotura de Mohr-Coulomb

Test / Specimen preparation	Mohr-Coulomb (with cohesion)			Mohr-Coulomb (without cohesion)		
	$\tau = c + \tan \varphi \sigma_n$			$\tau = \tan \varphi \sigma_n$		
	c (kPa)	$\varphi$ (°)	Regr. Coef.	c (kPa)	$\varphi$ (°)	Regr. Coef.
Test1:Mylonit e Dropped	25	39.5	0.998	0	44.5	0.950
Test2:Andesit e Dropped	25	38.5	0.987	0	42.0	0.956
Test3:Mylonit e Compacted	10	50.5	0.999	0	53.0	0.991
Test4:Andesit e Compacted	20	50.0	0.997	0	53.0	0.978



Highest regression coefficient  
Cohesion: 10-25 kPa  
Ballast ...cohesive material?

Lowest regression coefficients  
Friction angle: 42-45°...dropped ballast  
Friction angle: 53°...compacted ballast

# 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

## b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

### Resultados: Criterio de Rotura Parabólico

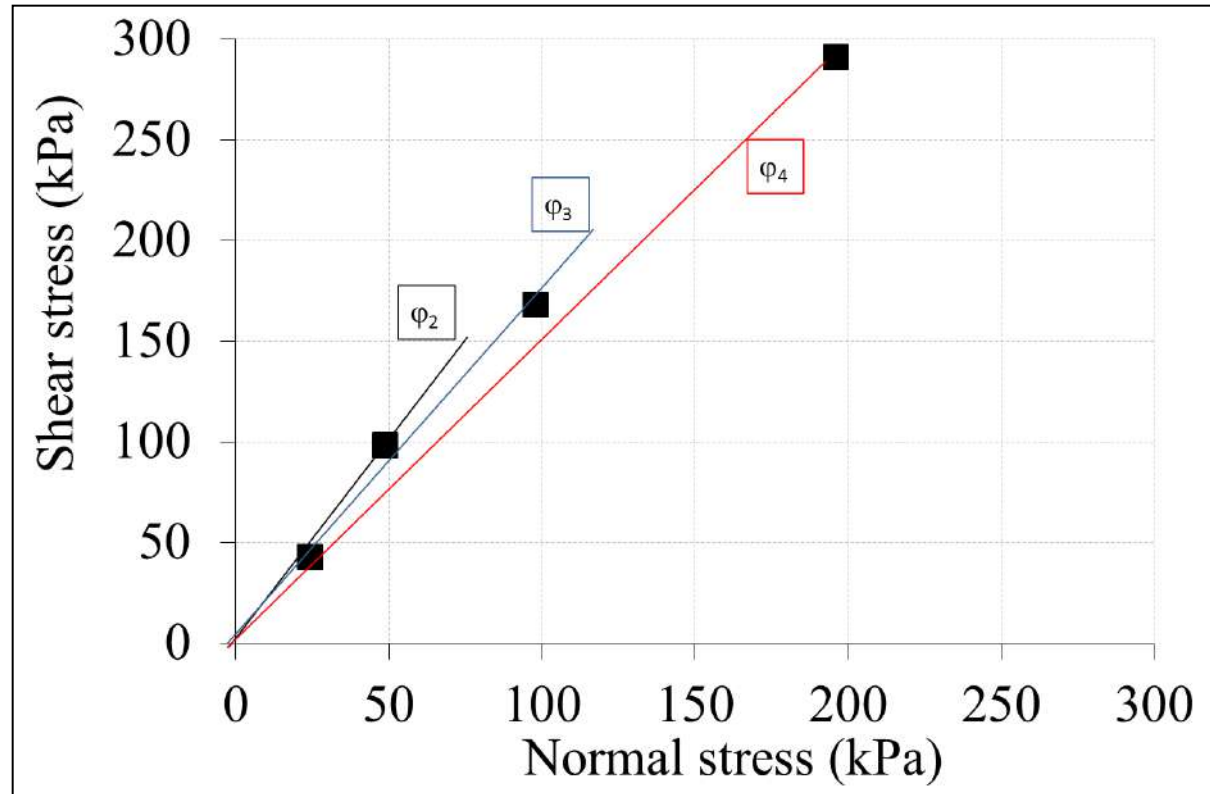
Test / Specimen preparation	Mohr-Coulomb  (with cohesion)			Mohr-Coulomb (without cohesion)			Parabolic model  $\tau = a \sigma_n^b$ $\tau = \tan \varphi_l \sigma_n^b = \tau_{Pa} (\sigma_n/p_a)^b$				
	$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi$			$\tau = \tan \varphi \sigma_n$							
	c (kPa)	$\varphi$ (°)	Regr Coef.	c (kPa)	$\varphi$ (°)	Regr. Coef.	a	$\varphi_l$ (°)	$\tau_{Pa}$ (kPa)	b	Regr. Coef.
Test1:Mylonit e Dropped	24	39.5	0.998	0	44.5	0.950	2.71	70.0	108	0.80	0.990
Test2:Andesit e Dropped	25	38.5	0.987	0	42.0	0.956	2.62	69.0	109	0.81	0.962
Test3:Mylonit e Compacted	11	50.5	0.999	0	53.0	0.991	3.10	72.0	135	0.82	0.993
Test4:Andesit e Compacted	21	50.0	0.997	0	53.0	0.978	3.00	71.5	144	0.86	0.970

- Intermediate (but high) regression coefficients
- Exponent “b” different 1 => non-linear failure envelope
- Coefficient “a” shows difference between dropped and compacted ballast
- For  $\sigma_n = 0 \Rightarrow \tau = 0$  ... No cohesion



## b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

### Resultados: Ángulo secante

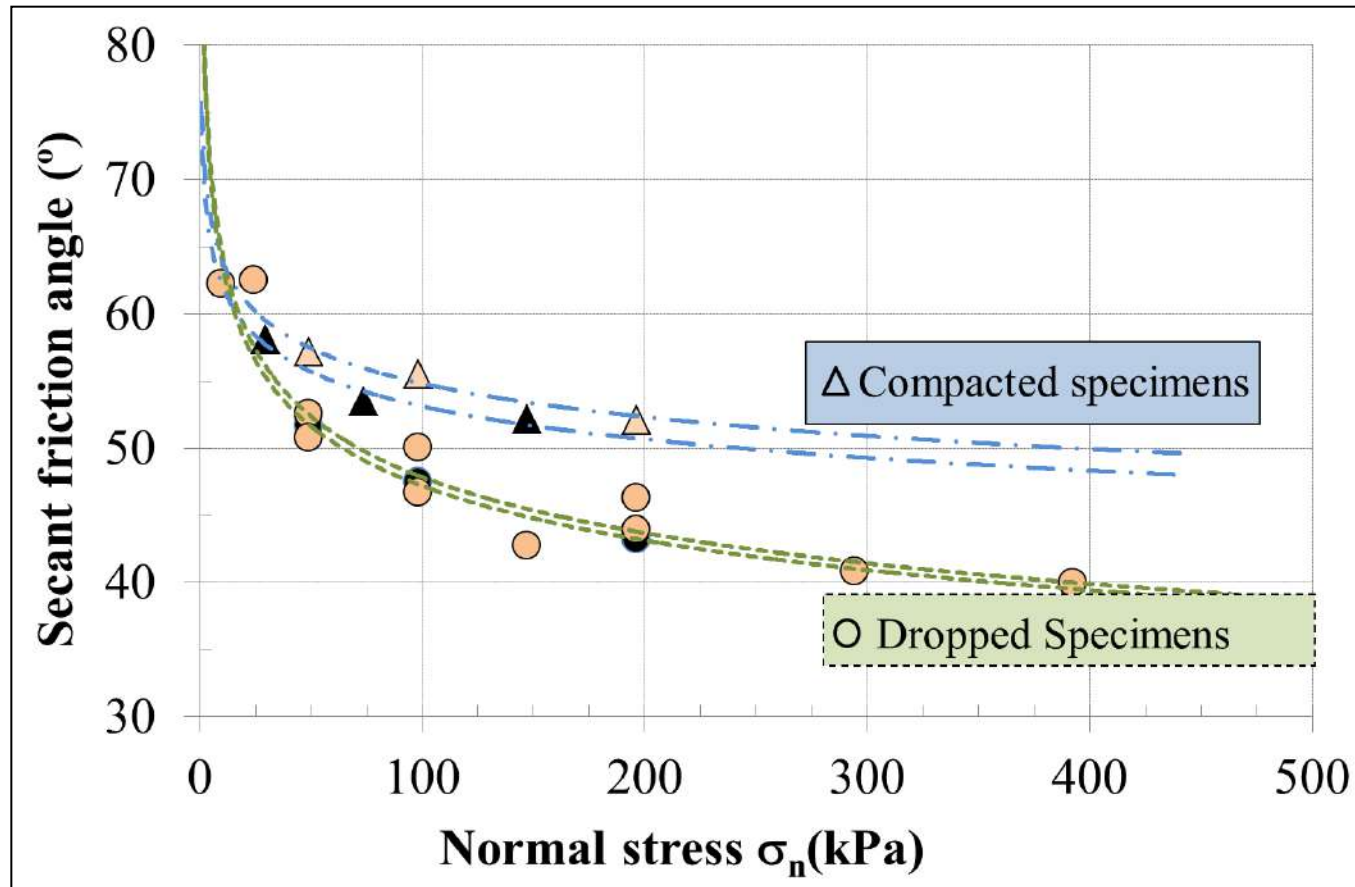


For each  $\sigma_n \Rightarrow \varphi_{\text{secant}}$

## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

### b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

#### Resultados: Ángulo secante



$\varphi_{\text{secant}}$  decreases with increase of  $\sigma_n \Rightarrow$  non-linear nature of ballast shear strength

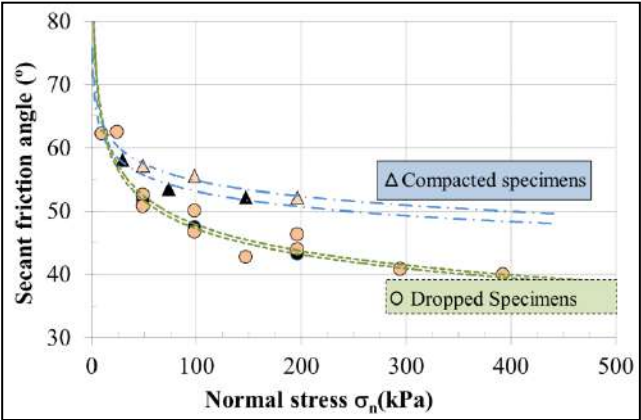
$\varphi_{\text{secant-compact}} > \varphi_{\text{secant-dropped}}$

$\varphi_{\text{secant}}$  for  $\sigma_n$  low (10 kPa) are great: 65° ...used to model STPT performed in CTB

4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

b) Diferentes tipos de balasto y diferente compactación

Resultados: Ángulo secante



Parabolic and logarithmic fitting curves

Test / Specimen preparation	Parabolic fitting curve $\varphi = \varphi_0 * (\sigma_v/p_a)^t$			Logarithmic fitting curve $\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \log(\sigma_v/ p_a)$		
	$\varphi_0^*(^{\circ})$	t	Regr. Coef.	$\varphi_0 (^{\circ})$	$\Delta\varphi (^{\circ})$	Regr. Coef.
Test I :Mylonite Dropping	47.0	-0.13	0.999	47.5	14.13	0.999
Test2 :Andesite Dropping	48.0	-0.13	0.926	48.5	14.65	0.913
Test3:Andesite Compacted	55.0	-0.07	0.964	55.0	8.45	0.962
Test4: Mylonite Compacted	53.0	-0.07	0.952	53.0	8.65	0.949



## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

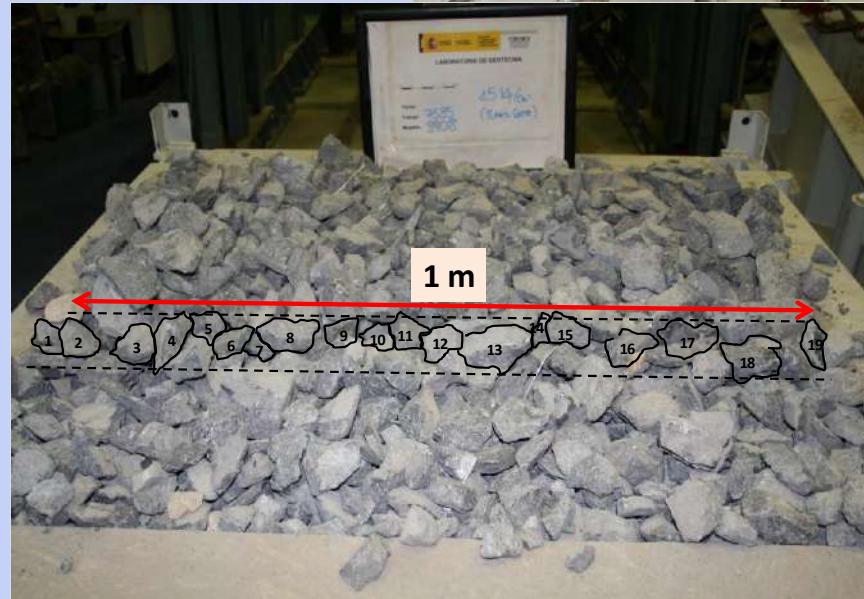
### c) Efecto escala en la caja de corte



**Shear box  
30 X 30 cm**

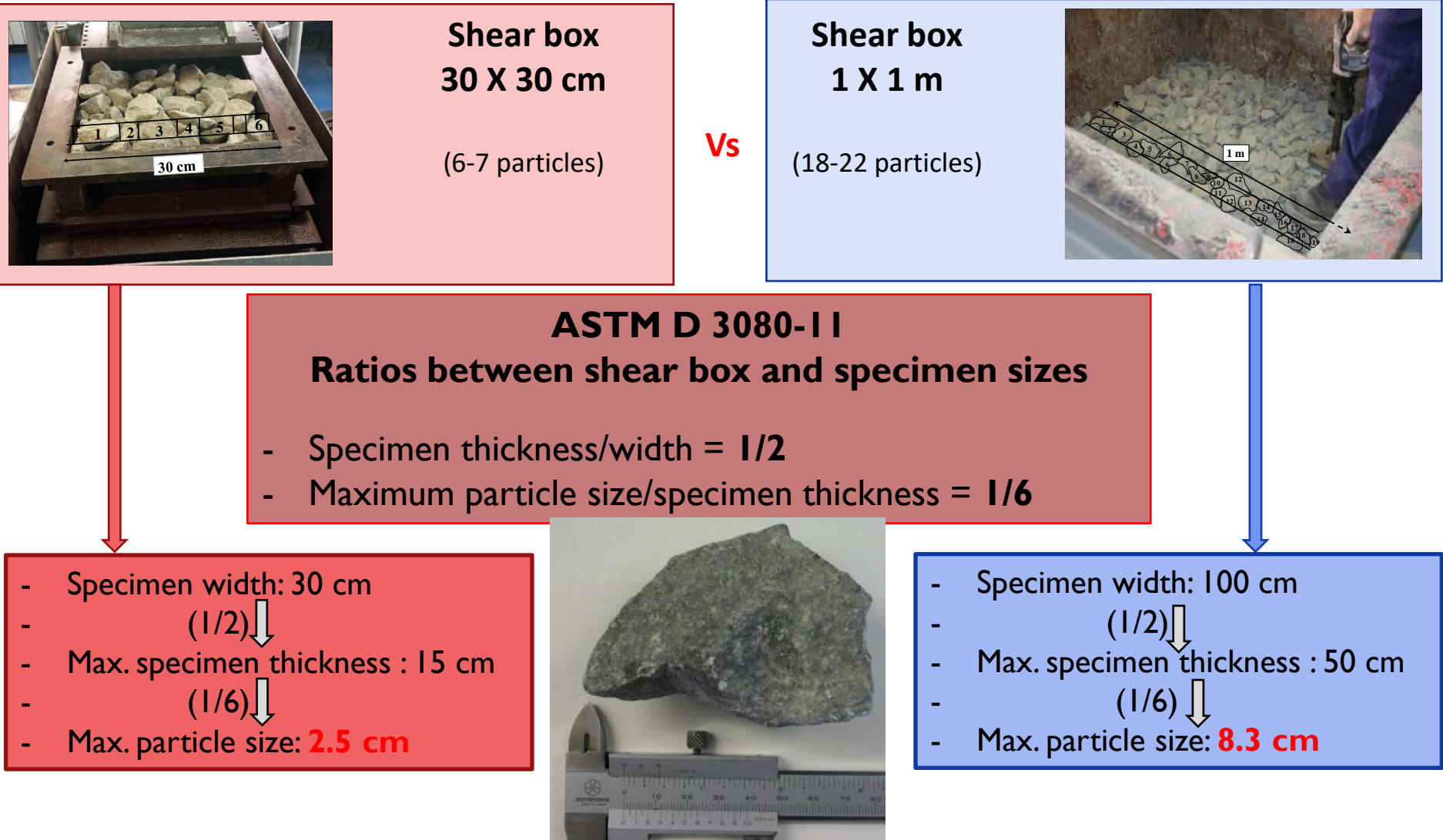


**Shear box  
1 X 1 m**



5. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

c) Efecto escala en la caja de corte

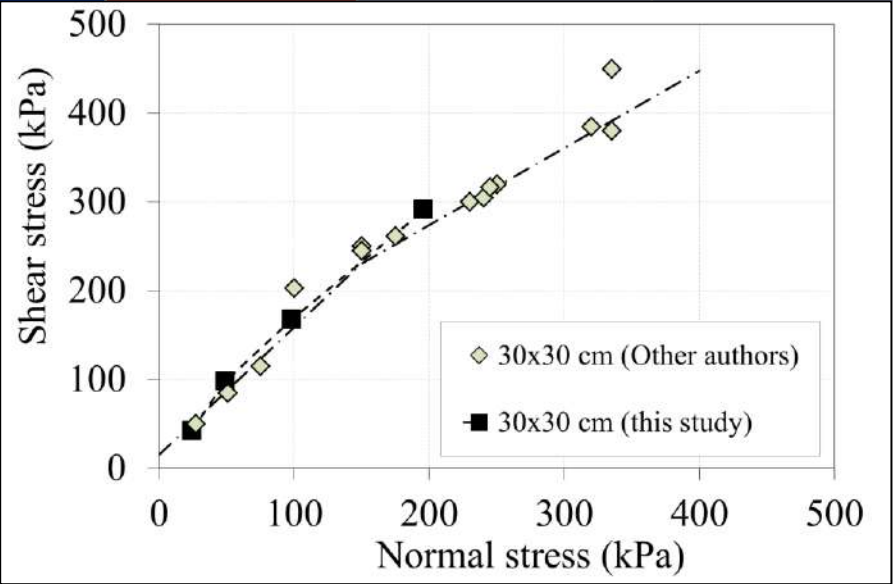


5. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

c) Efecto escala en la caja de corte

Comparación ensayos CEDEX-Bibliografía en corte 30 x 30 cm

Authors	Shear box size (cm)	Range of normal stress (kPa)	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)
Dowbrow et al.	30 x 30	150 – 335	15.0	75	47
Boler	30 x 30	150 – 335	15.4	100	41
Wnek et al.	30 x 30	100 – 250	14.9-15.5	125	38
Indraratna et al.	30 x 30	27 – 75	15.5	15	53
CEDEX	30 x 30	25 – 200	12.7 – 13.2	20	54



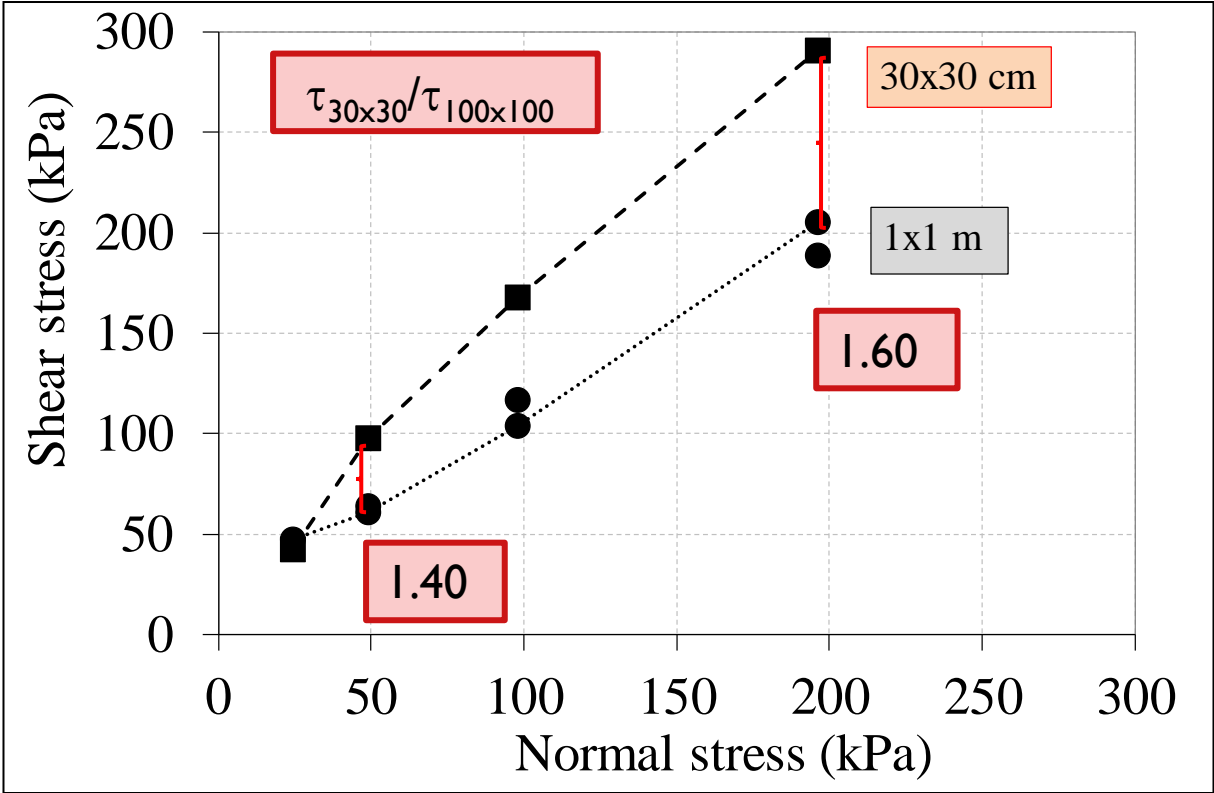
→ Good agreement for 30 x30 cm direct shear tests



5. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

c) Efecto escala en la caja de corte

Comparación ensayos CEDEX 30 x 30 cm vs 1mx1m



Ballast material: Andesite  
Preparation: by dropping  
Unit weight: 13-14 kN/m<sup>3</sup>  
Normal stress: 25, 50, 100 and 200 kPa

Shear box size	30 x 30 cm	1 x 1 m	
$\varphi$ (°)	57	42	$c = 0$ kPa
$\varphi$ (°)	54	38.5	$c = 25$ kPa

$\Delta\varphi = 15^\circ$

$\Delta$  Resistencia: 40-60%

# 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

## d) Resistencia superficie Travesía - Balasto

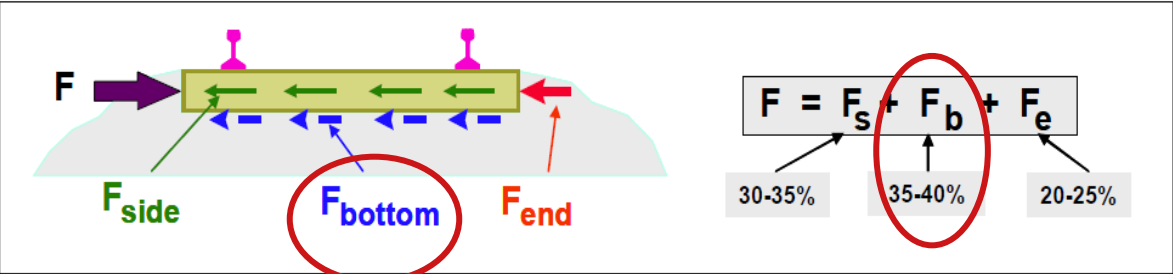
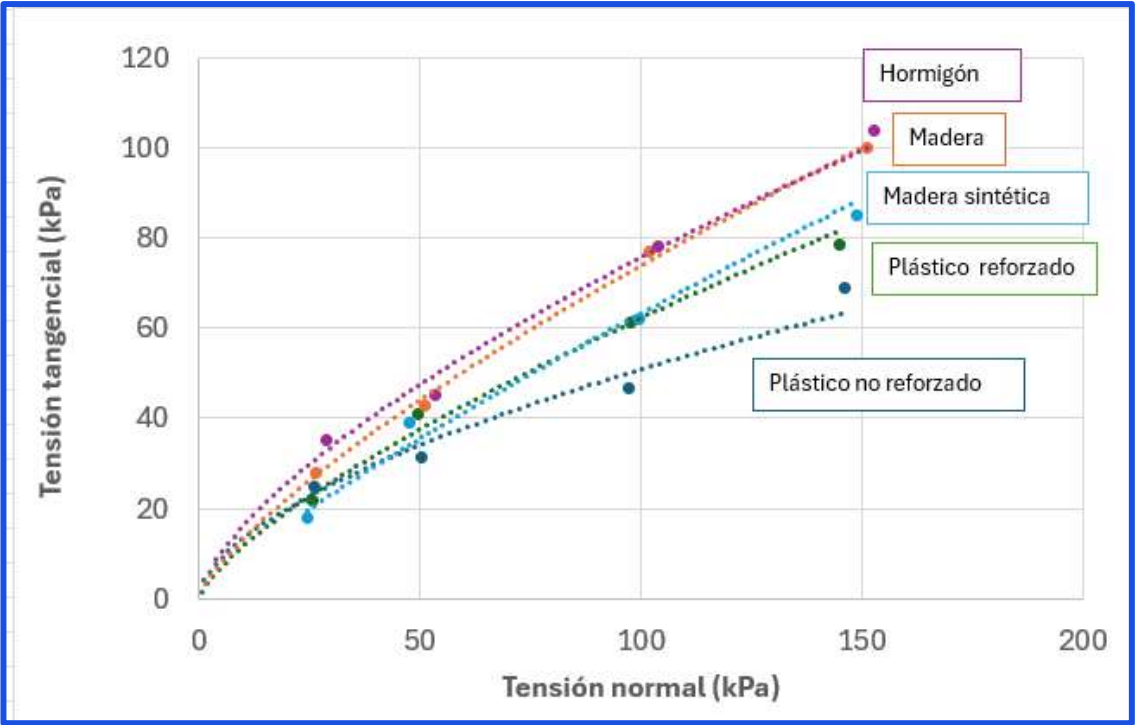


Figure 4 – Lateral Resistance Components



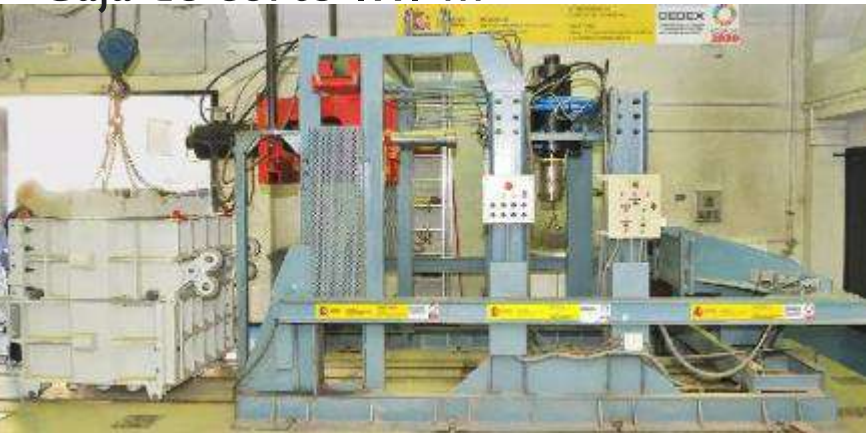
Caja de corte directo 1x1m



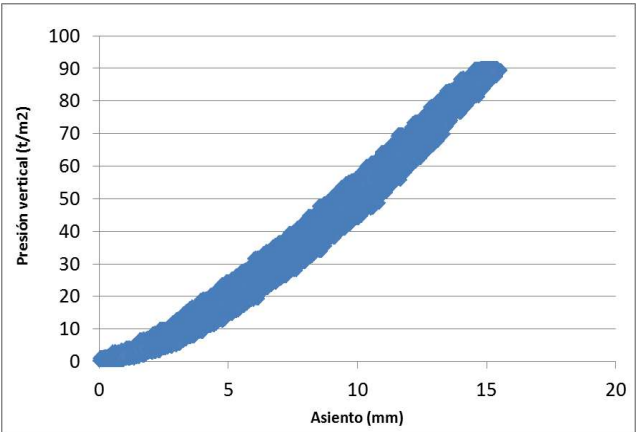
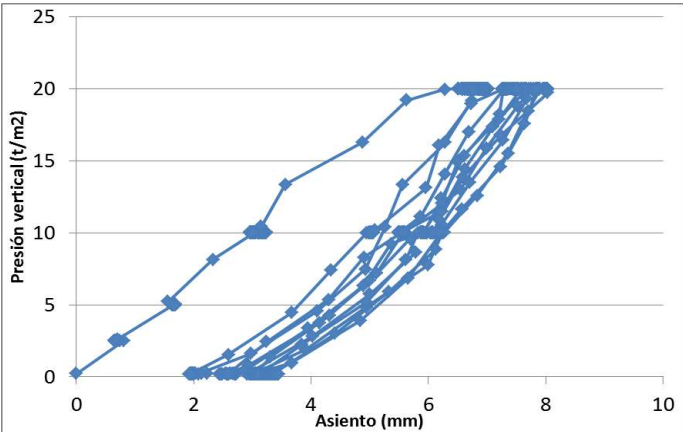
# 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – CORTE DIRECTO

## e) Ensayos de compresión confinada

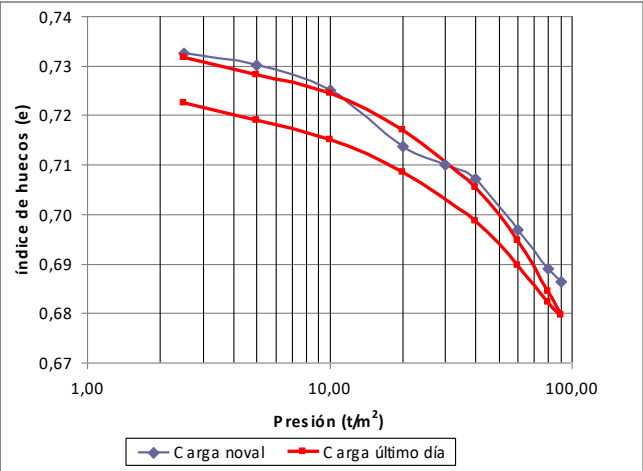
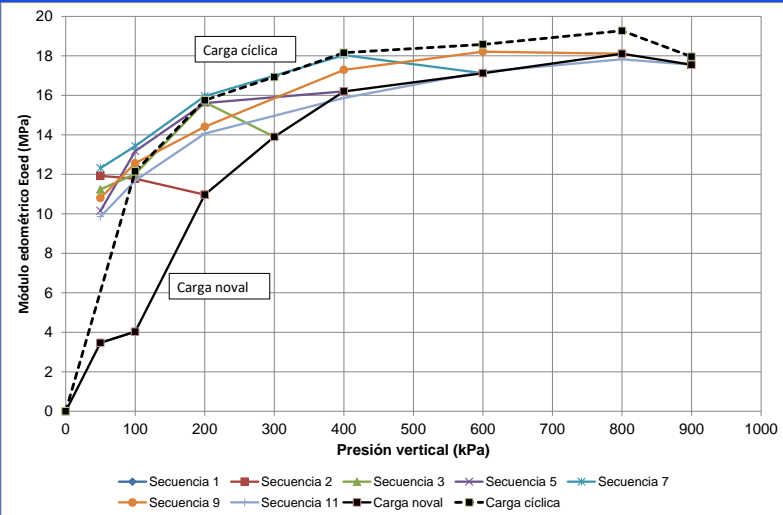
Caja de corte 1x1 m



Secuencia	Carga (kPa)	Ciclos (nº)
I	0 - 50 - 100 - 200 - 300 - 400 - 600 - 800 - 900	No
	0 - 900	Si(5)



- $E_{noval}$  ↑ al ↑  $\sigma_v$  (3,5 – 18 Mpa)
- $E_{recarga}$  ↑ al ↑  $\sigma_v$  pero menos significativo (11 – 18 Mpa)
- Rigidización importante hasta  $\sigma_v$ :200 Mpa
- $E_{caja} < E_{triaxial}$

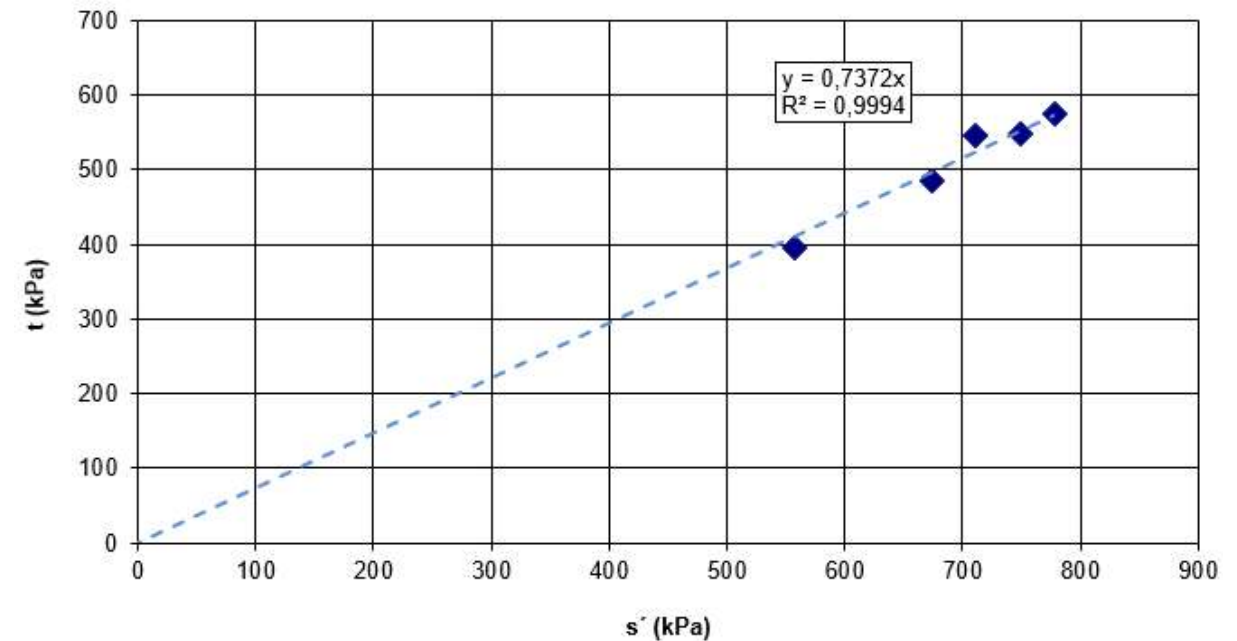
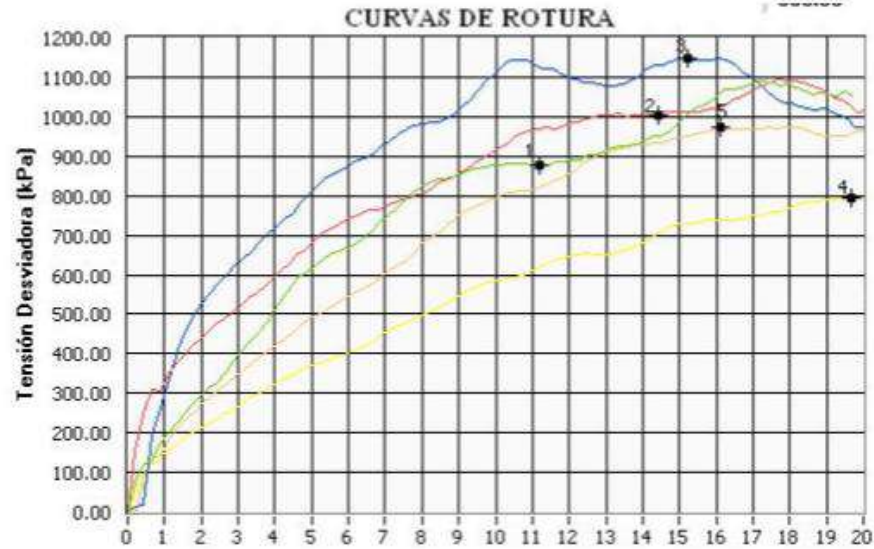




## 4. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – TRIAXIAL

### a) Resistencia, Triaxial cíclico y Permeabilidad

Célula de 9" (Ø: 23 cm y H: 46 cm)



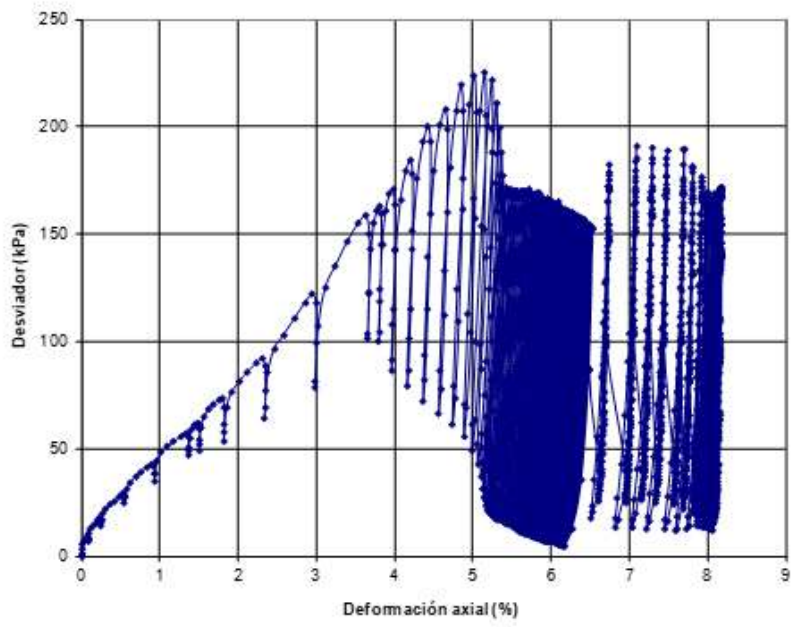
Ensayos TUU y TCU ( $\sigma_3$  hasta 300 kPa)

$\varphi = 47^\circ - 55^\circ$   
 Sin efecto en ángulo por  
 aumento del confinamiento

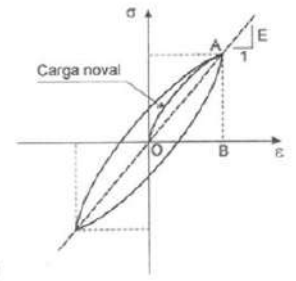
5. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – TRIAXIAL

a) Resistencia, Triaxial cíclico y Permeabilidad

Célula de 9" (Ø: 23 cm y H: 46 cm)



Cálculo de E y amortiguamiento



Módulo secante de deformación, E:

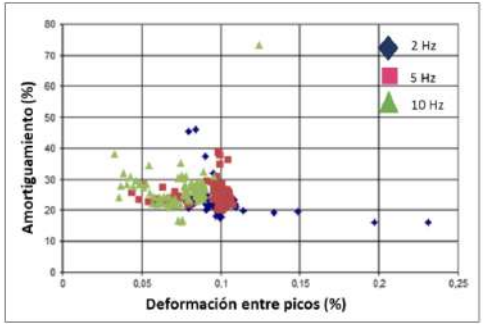
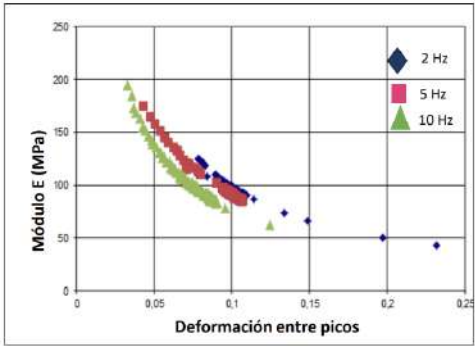
$$E = \frac{\sigma_{\text{ciclo}}}{\epsilon_{\text{ciclo}}}$$

Razón de amortiguamiento, D:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\text{área del ciclo}}{\text{área del triángulo OAB}}$$

**CEDEX**  
Carga máxima: 100 kN  
Confinamiento: 20 kPa

Frecuencias de trabajo: 2 / 5 / 10 /15 Hz



E: 100-200 MPa

Amortiguamiento: 20 %

## 5. ENSAYOS REALIZADOS POR EL CEDEX EN BALASTO – TRIAXIAL

### a) Resistencia, Triaxial cíclico y Permeabilidad

Célula de 9" (Ø: 23 cm y H: 46 cm)



*Permeabilidad –  $5 \times 10^{-2}$  cm/s*



- Las vías férreas españolas están mayoritariamente construidas con balasto
- Las funciones del balasto quedan asociadas a las propiedades requeridas por la normalización
- Caracterización mecánica del balasto realizada con:
  - Caja de corte de grandes dimensiones (1 m x 1 m)
  - Caja de corte de 30 cm x 30 cm
  - Ensayos triaxiales 9"
  - Triaxiales dinámicos 9"
  - Permeabilidad 9"

# SEMINARIO SOBRE GEOTECNIA FERROVIARIA



CEDEX

María SANTANA

[Maria.S.Ruiz@cedex.es](mailto:Maria.S.Ruiz@cedex.es)

CEDEX

Laboratorio de Geotecnia

 CEDEX\_es  CEDEX