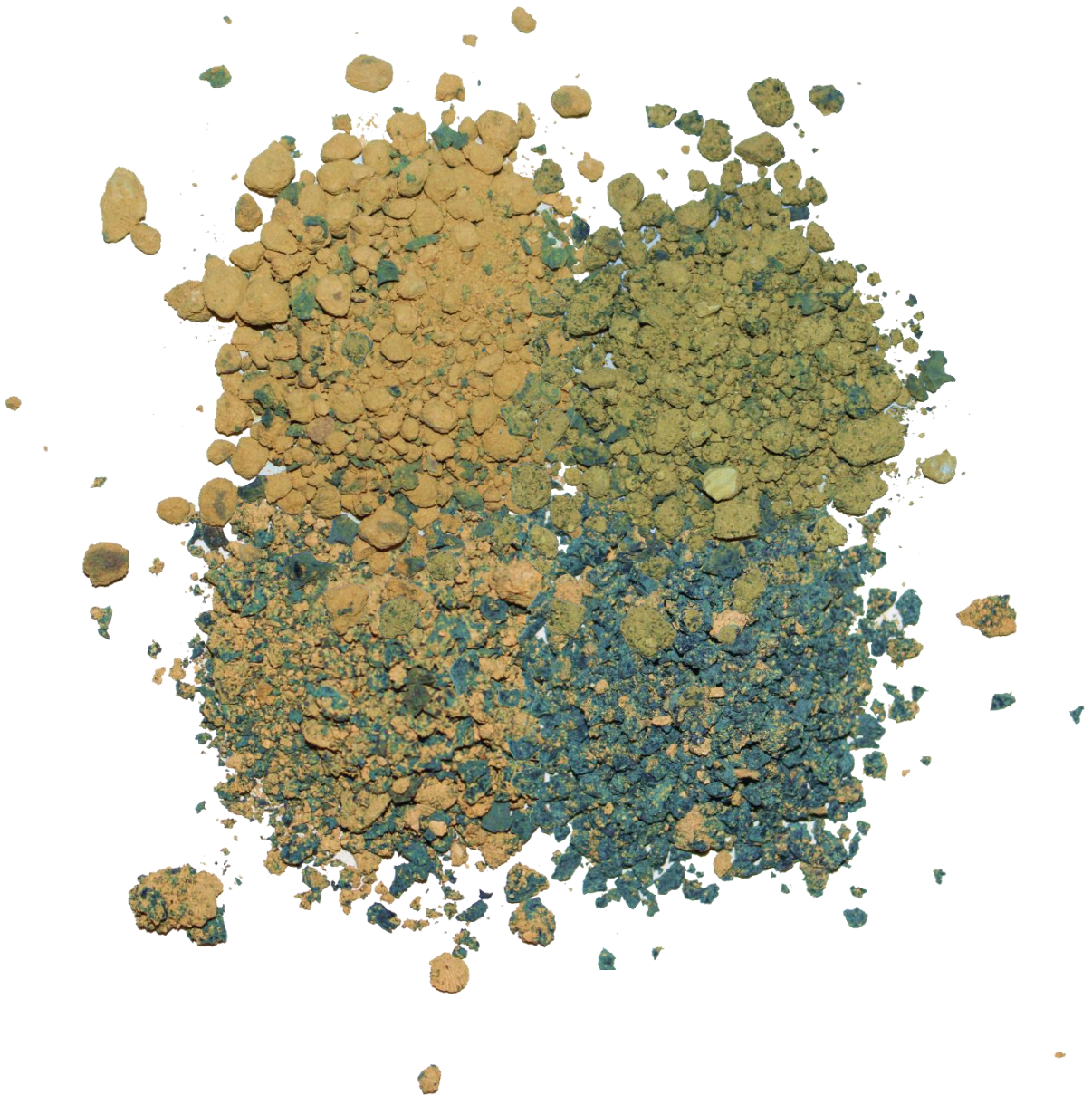




# Diseño experimental de suelos con materiales mixtos: tierra y granulado de neumático fuera de uso (NFU).



**GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA.**

**ALUMNO:** MARCELINO AGUILERA NOGUEROL.

**TUTORES TFG:** ANTONIO JARAMILLO MORILLA/ ROCÍO ROMERO HERNÁNDEZ.

**GRUPO TFG:** TFG-B

**CURSO:** 2018/2019

## ÍNDICE.

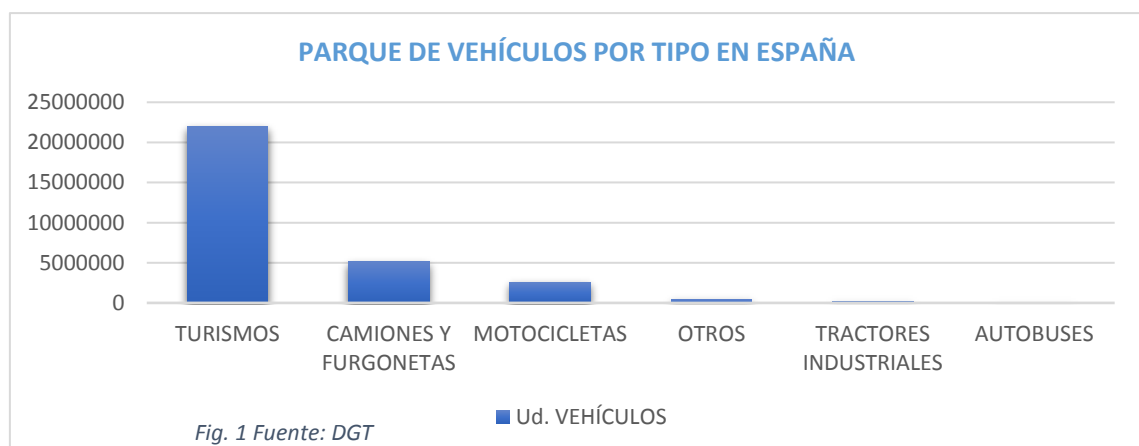
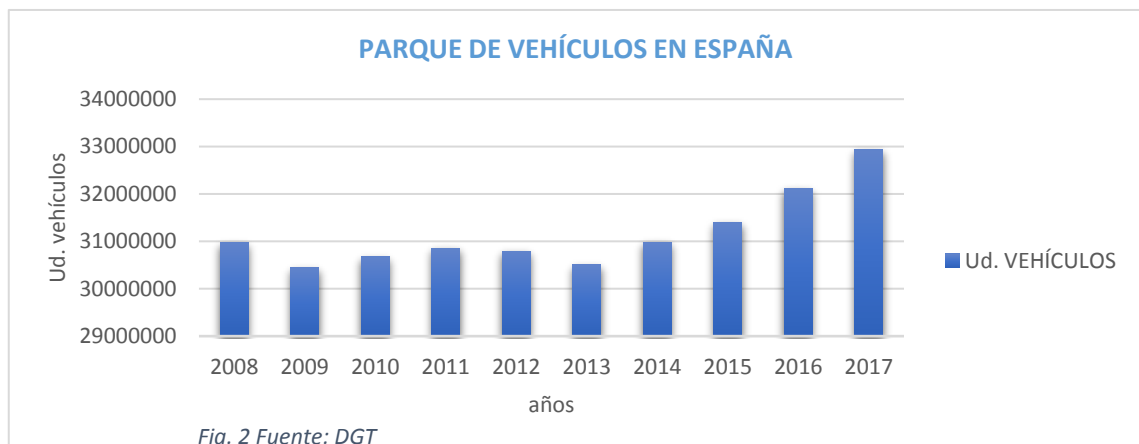
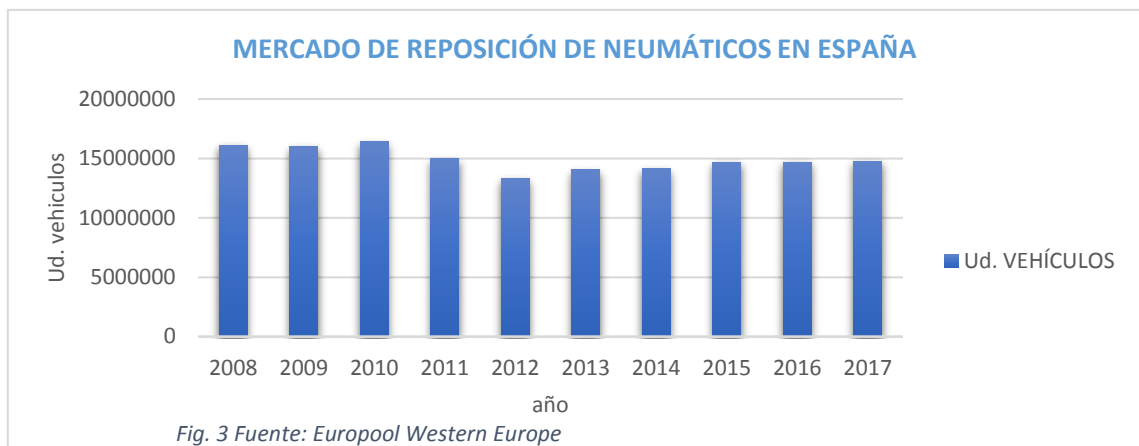
Diseño experimental de suelos con materiales mixtos: tierra y granulado de neumático fuera de uso (NFU). .....	1
1. INTRODUCCION. ....	3
1.1. MOTIVACIÓN.....	3
1.2. RELEVANCIA Y OPORTUNIDAD.....	5
1.3. OBJETIVOS GENERALES .....	5
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.5. ESTADO DE LA CUESTION.....	7
2. DESARROLLO.....	8
2.1. COMBINACIÓN DEL ALBERO Y EL GRANULADO NFU.....	8
2.2. CARACTERIZACIÓN DEL COMPUESTO.....	17
2.3. APLICACIONES PARA EL NFU Y EL COMPUESTO ENSAYADO. ....	30
3. CONCLUSIONES.....	34
4. IDEAS PARA AMPLIAR EL TRABAJO DESARROLLADO. ....	35
5. BIBLIOGRAFÍA. ....	36
6. ANEXO DE GRÁFICAS. ....	37

## 1. INTRODUCCION.

### 1.1.MOTIVACIÓN.

La motivación principal de este trabajo de investigación proviene de una serie de problemáticas y oportunidades que se acontecen en este momento en España.

- La principal problemática es la acumulación permanente de neumáticos, que aunque son tratados para su posterior reciclado en plantas como SIGNUS, no se consigue dar salida a dicho producto por lo que la acumulación de material va en aumento.



- (Fig.1) Las unidades de neumáticos consumidos en España apenas varía.
- (Fig.1) La acumulación de neumáticos continúa.
- (Fig.2) El parque de vehículos en España va en aumento.
- Nuevas empresas como SIGNUS, procesan los neumáticos para su posterior reutilización.
- Necesitamos dar salida al material acumulado.
- Por otro lado un notable auge de la construcción en España tras la crisis de 2008, nos permite considerar que es un buen ámbito para buscar salida a dicho material generado por las empresas de tratado.



- (Fig.4) Comparando la actualidad con cifras del boom inmobiliario la construcción cae un 89%.
- (Fig.5) Comparando con las cifras del peor momento de la crisis (2012), la construcción aumenta un 63%.
- Encontramos en este sector, una oportunidad para dar salida al reciclado de neumáticos.

## 1.2.RELEVANCIA Y OPORTUNIDAD.

Con toda la problemática presentada anteriormente, podríamos de decir que es de vital importancia dar salida al reciclado de neumático fuera de uso (NFU), y uno de los ámbitos en el cual lo podemos implantar es en la construcción. Se nos presenta junto a esto, la oportunidad y posibilidad de desarrollar dicha investigación con el apoyo del grupo de investigación TEP-018. Ingeniería del terreno de la Universidad de Sevilla en cuyos estudios y trabajos está muy presente el granulado (NFU).

En este punto se podría destacar el vital ofrecimiento del Doctor Antonio Jaramillo Morilla y Rocío Romero Hernández como tutores del TFG y del Arquitecto Emilio Mascort Albea y la Ingeniera Civil Elizabeth Contreras Marín que muy implicados, en campos diferentes, pero recogidos y yuxtapuestos en el objeto de estudio de este trabajo, pretenden proporcionar toda la información y ayuda que esté en su mano.

En definitiva, y con el panorama actual referido al a acumulación, caracterización y reciclado de neumático fuera de uso (NFU) es de vital importancia poner sobre la mesa estudios que corroboren o de cierta manera indiquen una nueva forma de dar salida a los diferentes productos acumulados en las platas de tratado repartidas por toda España. .

## 1.3.OBJETIVOS GENERALES

El principal objetivo de este proyecto es analizar y buscar aplicaciones y métodos para dar salida y poner en uso los neumáticos fuera de uso (NFU).

*Según datos de 2004, en España se generan un total de 230.000 toneladas de neumáticos que deben gestionarse correctamente. Se han definido las estrategias que se llevarán a cabo para valorizar los residuos generados por NFU, según las cuales(...)El 35% se empleará para valorización material, unas 80.000 Ton que deberán utilizarse para asfaltos, pistas deportivas y obra civil (...). En obra civil se puede aprovechar el NFU en taludes. (Serrano, García, & Fraile, 2007)*

Dentro de esta valorización del material, enfocaremos nuestro trabajo de investigación ya que buscaremos a través de la combinación de materiales como el albero y el granulado de NFU ensayar y analizar compuestos con diferentes porcentajes de mezcla, para comprobar sus posibilidades de implantación en obra civil. *Y es que Para valorizar los neumáticos usados, se privilegiaran los procedimientos que permiten reciclar directamente los materiales y en consecuencia usar con moderación los recursos naturales. (Serrano, García, & Fraile, 2007)*

#### 1.4.OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Profundizando en las expectativas de este TFG podemos diferenciar tres líneas dependientes respectivamente unas de otras.

##### **A) CARACTERIZACIÓN DE ALBERO Y GRANULADO NFU.**

En primer lugar se procederá recoger, caracterizar y preparar las muestras de los diferentes materiales con los que trabajaremos.

Por un lado utilizaremos el albero como principal componente del compuesto. Albero procedente del laboratorio de Mecánica de suelo y cimentaciones, bien catalogado y caracterizado.

Por otro lado encontramos el granulado NFU, el cual será también aportado por el departamento de Mecánica del suelo y cimentaciones y del cual ya tenemos bastante información contrastada sobre sus propiedades.

##### **B) COMBINACIÓN DE ALBERO Y NFU.**

En segundo lugar y habiendo cumplido todos los objetivos anteriores, pasaremos al eje principal de esta investigación, trataremos de combinar dichos materiales y analizar su comportamiento mediante diferentes ensayos. Intentando buscar la mejor combinación, el compuesto que mejor se implemente como suelo y siempre con objetivos de encontrar un compuesto que presente ventajas sobre los suelos empleados tradicionalmente en la tradición constructiva española.

Los ensayos a realizar serán los siguientes:

- Próctor Normal.

*“Esta norma tiene por objeto especificar el método para determinar, en un suelo, la relación entre la densidad seca y la humedad, para una energía de compactación de unos 0,583 J/cm<sup>3</sup>, y definir la densidad seca máxima y su humedad correspondiente, denominada óptima que se pueden conseguir con ese suelo en el laboratorio.”*

*(UNE-103-500-94)*

- Corte Directo.

*“Esta norma tiene por objeto la determinación de los parámetros resistentes, cohesión,  $c$ , y ángulo de rozamiento interno,  $\Phi$ , de una muestra de suelo sometida a esfuerzo cortante. También se pueden obtener los parámetros de resistencia residual,  $c_R$  y  $\Phi_R$ .”*

*“Esta norma se utiliza preferentemente en muestras de suelos con partículas de pequeño tamaño, como las arenas, limos y arcillas. No obstante, se pueden extender a muestras de suelos con partículas de mayor tamaño, como gravas, bolos, etc.” (UNE-103-401)*

- Edómetro.

*“Este ensayo se utiliza para determinar las características de consolidación de los suelos. Para ello, una probeta cilíndrica confinada lateralmente, se someta a diferentes presiones verticales, se permite el drenaje por sus caras superior e inferior, y se miden los asientos correspondientes.” (UNE-103-405-94)*

### **C) POSIBLES APLICACIONES DE LOS COMPUESTOS ENSAYADOS.**

Finalmente, en este punto se desarrollará un estudio de las posibles aplicaciones de este compuesto y de su adecuación a ello. Entre las posibilidades de aplicación a estudiar destacaremos dos líneas principales.

Por un lado analizaremos su funcionamiento y adecuación como suelos para (PG-3) terraplenes, rellenos, rellenos todo en uno, mejora del terreno e implantación como rellenos de muros de contención.

Para ello, compararemos los datos de nuestro trabajo con los de otras publicaciones de actualidad muy relacionadas con este tema. También se expondrá un caso práctico donde se ha utilizado el neumático fuera de uso (NFU) como material de relleno de muros de contención. Expondremos sus ventajas e inconvenientes y lo relacionaremos con los ensayos realizados.

### **1.5. ESTADO DE LA CUESTION.**

Actualmente existen muchos estudios relacionados con el reciclaje, caracterización del material y posibilidad de implantación de neumáticos fuera de uso (NFU), de entre todos cabe destacar dos artículos que han sido importantes referencias para el desarrollo del trabajo y para la comparación de resultados, estos artículos son:

- Zhang, T., Cai, G., & Duan, W. (2018). Strength and microstructure characteristics of the recycled rubber tire-sand mixtures as lightweight backfill.
- Reddy, S. B., Krishna, A. M., & Reddy, K. R. (2018). Sustainable Utilization of Scrap Tire Derived Geomaterials for Geotechnical Applications

A pesar del gran número investigaciones existentes sobre el neumático fuera de uso, hemos de decir que su aplicación y puesta en marcha de proyectos reales es mínima en lo que refiere a implantación en obra civil, por lo que este estudio podría presentar apoyo y reiterar a estudios previos, confirmando resultados y aplicaciones reales

## 2. DESARROLLO.

### 2.1.COMBINACIÓN DEL ALBERO Y EL GRANULADO NFU.

#### → CARACTERIZACIÓN DEL ALBERO.

- LOCALIZACIÓN DEL MATERIAL.

Los primeros trabajos que se realizaron se corresponden con la localización y disponibilidad del material. Disponemos de una cantidad suficiente de albero en el repositorio del laboratorio.

- DISPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA. ESTUDIO GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO. (UNE-EN 933-1;2012)

Para poder realizar una combinación exhaustiva de materiales, es necesario conocer al detalle su composición granulométrica por lo que procedimos a la realización de un estudio granulométrico del albero.

Para dicho material obtuvimos los siguientes resultados:

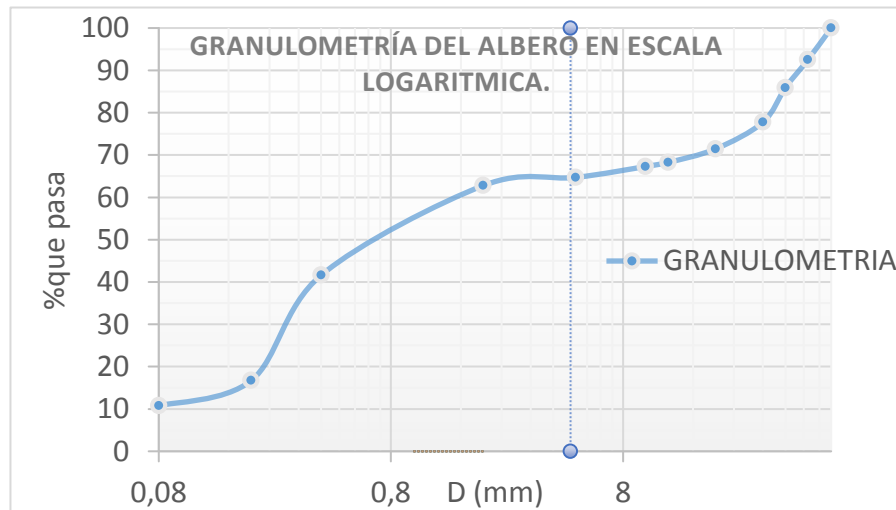


Fig. 6

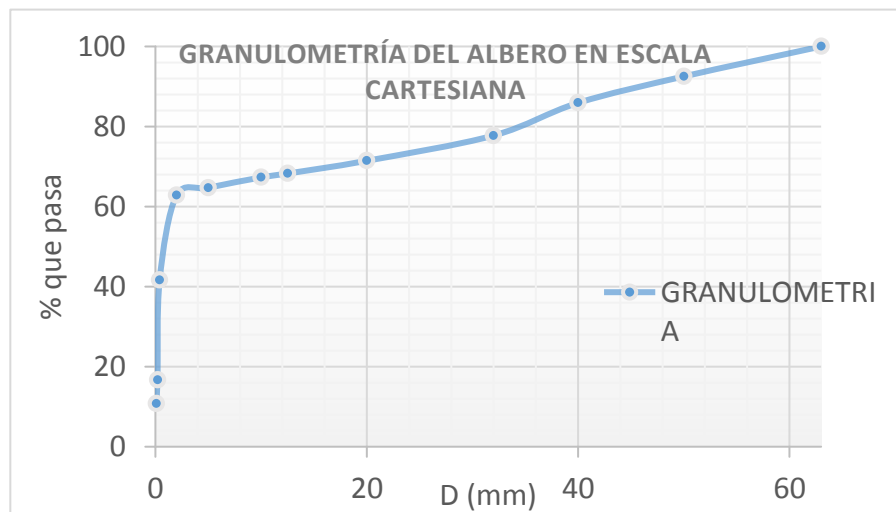


Fig. 7



- DENSIDAD APARENTE DEL ALBERO.

Este dato (Tabla.1) ha sido aportado por el personal del laboratorio de ensayos de dicho albero realizados anteriormente.

Tabla 1

MUESTRA ALBERO	D. APA. (g/cm <sup>3</sup> )
	2,020

### ➔ CARACTERIZACIÓN DEL GRANULADO NFU

- LOCALIZACIÓN DEL MATERIAL.

Al igual que el albero, el granulado NFU ha sido aportado por el laboratorio, procedentes de las plantas de tratado de neumáticos SIGNUS.

- DISPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA.

El material, a diferencia del albero viene suministrado en diferentes granulometrías por lo que no es necesario el estudio granulométrico de dicho material.

Las granulometrías de las cuales disponemos para el ensayo son:

< 0,6mm/0,6-2mm/2-4mm/2-7mm



Fig. 8

- DENSIDAD APARENTE DEL GRANULADO NFU.

Dicha caracterización es tomada del proyecto GRENECO donde participa Elizabeth Contreras y María Angüita. Las densidades irán diferenciadas en función de la granulometría de la muestra:

Tabla 2 (Fuente: proyecto GRENECO)

MUESTRAS NFU	D. APA. (g/cm <sup>3</sup> )
1 (RE3) g <sub>2</sub> >0,6mm	1,068
2(RE3) 0,6-2mm	1,074
3(RMD4) g <sub>2</sub> 2-4mm	0,951
4(RMD4) 2-7mm	0,944

➔ **CÁLCULO DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA ÓPTIMA.**

Para ellos utilizamos el Método de Füller (FL-90) con el cual obtendremos la curva granulométrica óptima de máxima compactación.

$$p = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Donde:

p = porcentaje en peso que pasa por el tamiz

d = abertura (diámetro) de cada tamiz.

D = tamaño máximo (diámetro) del árido.

Fig. 9

- El rango granulométrico a utilizar va de partículas D=10mm < y mayores de d=0,08mm
- Para este rango de partículas, obtenemos los siguientes porcentajes óptimos de áridos (Tabla.3).

Tabla 3

CUADRO DE GRANULOMETRÍA ÓPTIMA SEGÚN FULLER.				
TAMICES	% PASANTE	% ACUMULADO	% AJUSTADO	
			REPARTO PROPORCIONAL	AJUSTE FINAL
10	99	1	1,00	0,00
5	70,71	29,29	2,62	31,91
2	44,72	25,99	2,32	28,31
0,4	20,00	24,72	2,21	26,93
0,2	14,14	5,86	0,52	6,78
0,08	8,94	5,20	0,46	6,06
<b>TOTAL ACUMULADO</b>		91,06	8,14	100
<b>TOTAL PÉRDIDAS</b>		8,94	0,80	0

- La designación del árido según norma EHE-08 será:

A los efectos de esta Instrucción, los áridos se designarán, de acuerdo con el siguiente formato:

$$d/D - IL$$

D= 10mm

d= 0,08

IL= M

N= C y R

- **0,08/10-M-CR**

donde:

d/D Fracción granulométrica, comprendida entre un tamaño mínimo, d, y un tamaño máximo, D, en mm.

IL Forma de presentación: R, rodado; T, triturado (de machaqueo); M, mezcla.

Preferentemente, se indicará también la naturaleza (N) del árido (C, calizo; S, silíceo; G, granito; O, ofita; B, basalto; D, dolomítico; Q, traquita; I, fonolita; V, varios; A, artificial; R, reciclado), en cuyo caso, la designación sería:

$$d/D - IL - N$$

En la fase de proyecto, a efectos de la especificación del hormigón, es necesario únicamente establecer para el árido su tamaño máximo en mm, de acuerdo con 39.2 (donde se denomina TM) y, en su caso, especificar el empleo de árido reciclado y su porcentaje de utilización.

Fig. 10

Tabla 28.3.a

Requisitos generales de los tamaños máximo D y mínimo d

- Representanc rango granul

Árido	Árido	Porcentaje que pasa (en masa)				
		2 D	1,4 D <sup>0,75</sup>	D <sup>0,5</sup>	d	d/2 <sup>0,75</sup>
Árido grueso	D > 11,2 y D/d > 2	100	98 a 100	90 a 99	0 a 15	0 a 5
	D ≤ 11,2 ó D/d ≤ 2	100	98 a 100	85 a 99	0 a 20	0 a 5
Árido fino	D ≤ 4 y d = 0	100	95 a 100	85 a 99	—	—

Tabla 4

- CURVA DE FULLER PARA NUESTRO RANGO GRANULOMÉTRICO.

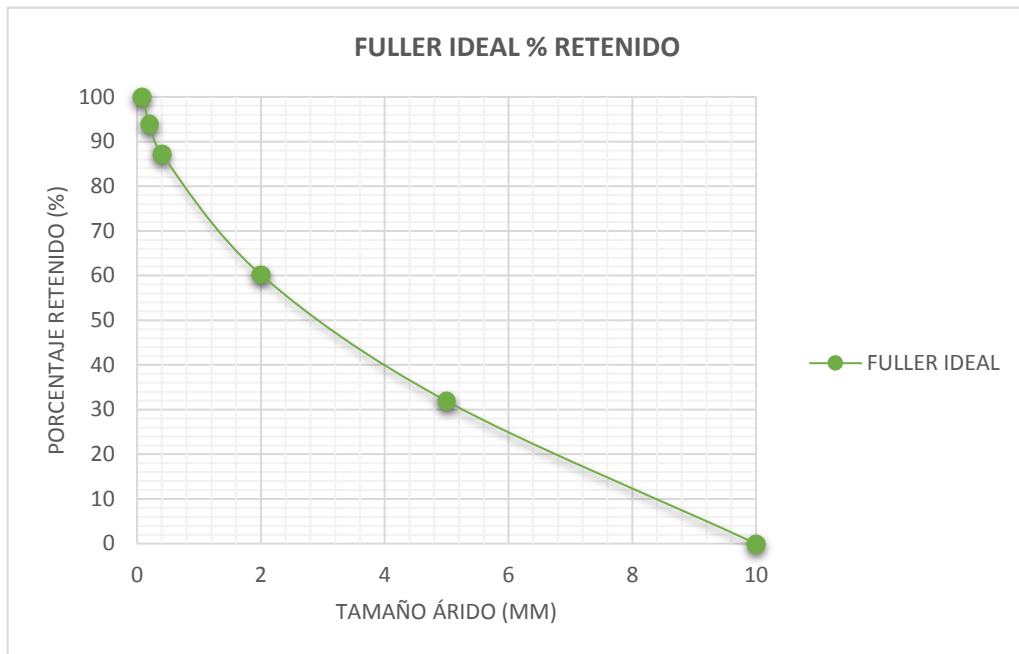


Fig. 11

- CURVA DE FULLER PARA NUESTRO RANGO GRANULOMÉTRICO

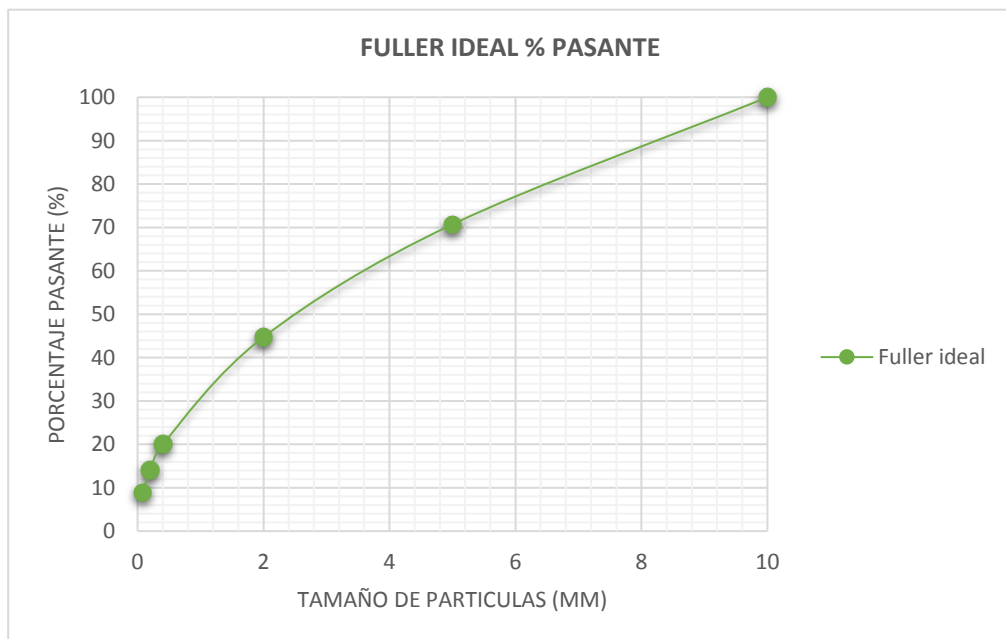
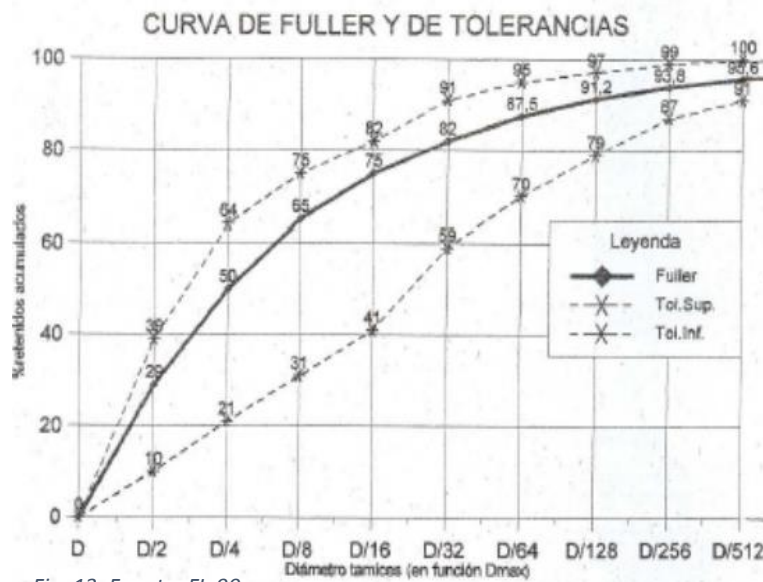


Fig. 12

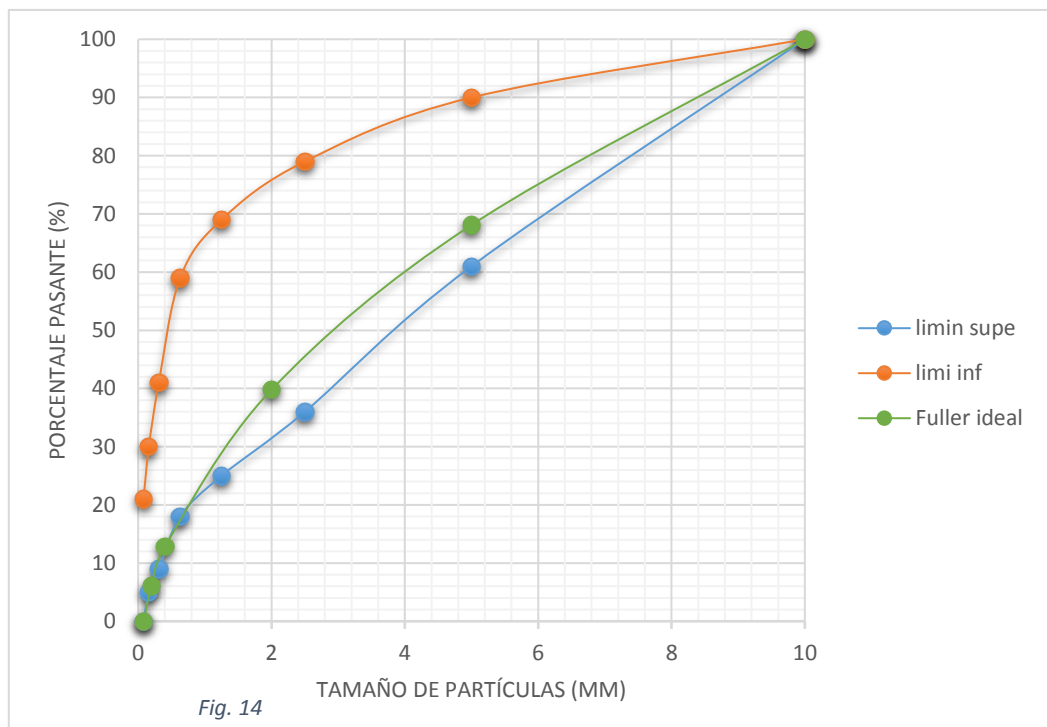
➔ HUSO GRANULOMÉTRICO PARA ÁRIDOS (FULLER)

Representa el árido de máxima compacidad y las tolerancias inferiores y superiores en función del Tamaño máximo (D= 10) según el EHE-08. Y FULLER FL-90



(Fig.14) Con ello podemos comprobar que la curva de máxima compacidad calculada para nuestro rango granulométrico está dentro de los límites superiores e inferiores que dicta la norma.

- HUSO GRANULOMÉTRICO FULLER (% ACUMULADO)



➔ **COMPARACIÓN CURVA GRANULOMETRÍA DEL ALBERO CON CURVA IDEAL Y TOLERANCIAS DE FULLER.**

- (Fig. 15) La curva granulométrica del albero tamizado, no cumple con las tolerancias de Fuller. A partir de aproximadamente los 5mm, la curva del albero se sale de los límites por lo que habrá que ajustar la granulometría del albero.

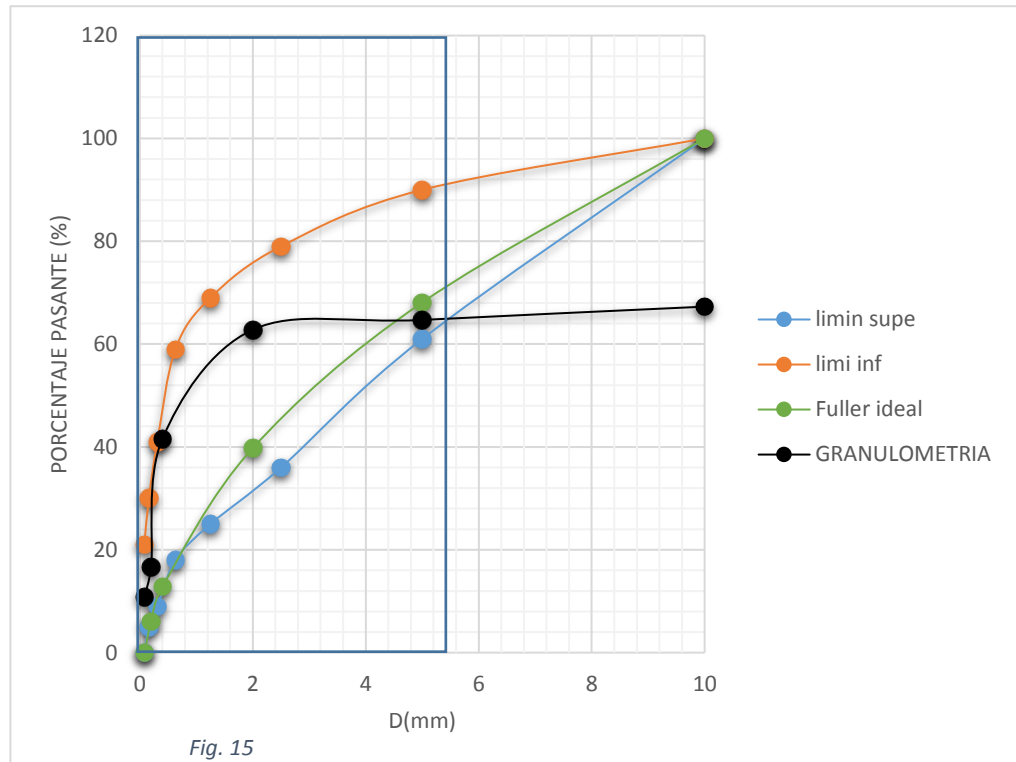


Fig. 15

- Para que se ajuste lo máximo posible a la curva de fuller, procederemos a tamizar el albero y separarlos en las diferentes granulometrías a utilizar, y posteriormente las combinaremos en los porcentajes que se ajustan a la línea Ideal de Fuller.



Fig. 16 (diferentes granulometrías del albero.)

➔ **PROPORCIONES DE COMBINACIÓN DE MATERIALES.**

Para preparar las mezclas de arena (albero) y neumáticos de caucho triturado, se añadió un volumen predeterminado de arena (albero) lavada y secada al aire al caucho triturado. El índice de fracción de volumen de caucho se empleó en este estudio para indicar la relación de volumen de estos dos materiales, que se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$RF = \frac{V_{\text{rubber}}}{V_{\text{total}}} \times 100\%$$

Fig. 17

Donde RF es la fracción de volumen de caucho (%), V de caucho es el volumen de caucho triturado y V total es el volumen total de la muestra de arena (albero) y caucho.

(Zhang, Cai, & Duan, 2018)

Los índices de fracción del volumen del caucho con respecto al total, se realizara mediante una aproximación sistemática que recogerá un abanico de compuestos que variaran su contenido de caucho de 10 a 75%, pasando por un 25 y un 50%.

Tabla 5

DESIGNACIÓN MUESTRA	PORCENTAJE DE NFU	PORCENTAJE ALBERO
A (RF-10)	10	90
B (RF-25)	25	75
C (RF-50)	50	50
D (RF-75)	75	25

Una vez definidos los porcentajes en que vamos a mezclar de ambos materiales, realizaremos las mezclas sustituyendo el albero por NFU hasta obtener la proporción deseada, siempre teniendo en cuenta la densidad del material que se sustituye (albero) y del material que se incorpora (NFU), para no alterar la curva de Fuller (Fig.11/12) calculada previamente.

Dependiendo del porcentaje en que se combinen los materiales, se sustituirá un mayor o menor rango de partículas de Albero por partículas de caucho. Por ejemplo en la combinación A (RF-10) (Fig.18) podemos ver como solo se han combinado granulometrías de 5-2-0,4mm, mientras en las demás combinaciones B-C-D, se ha llevado a cabo una sustitución de partículas de albero en todo el rango granulométrico.

A) RF-10: 10% NFU + 90% ALBERO.

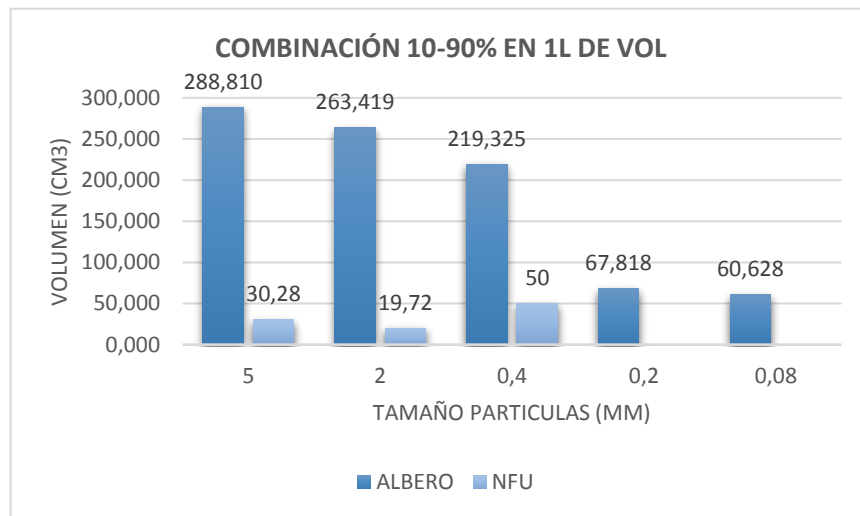


Fig. 18

- Reparto de NFU según su granulometría:

Tabla 6

TAMAÑO NFU	VOL. AÑADIDO
<0,6mm	0,00cm <sup>3</sup>
0,6-2mm	50cm <sup>3</sup>
2-7mm	30,28cm <sup>3</sup> +19,72cm <sup>3</sup>

B) RF-25:25% NFU + 75% ALBERO

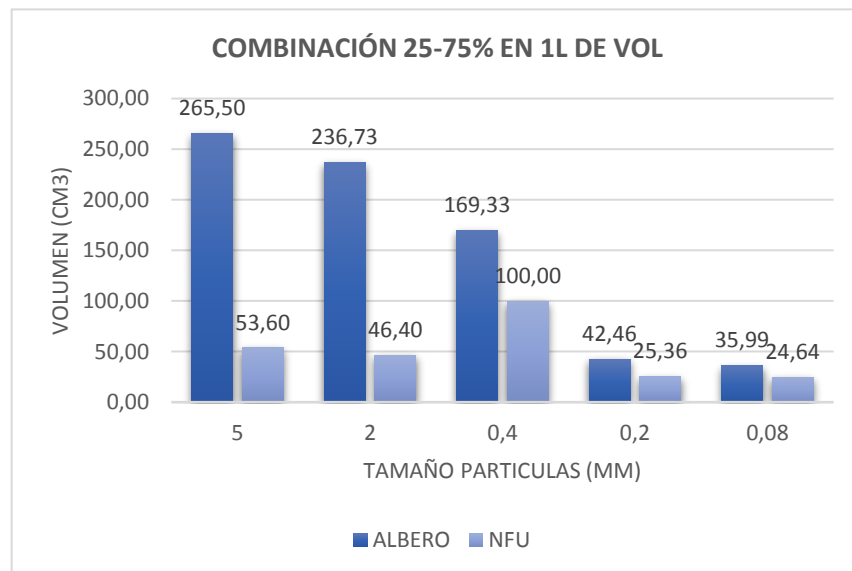


Fig. 19

- Reparto de NFU según su granulometría:

Tabla 7

TAMAÑO NFU	VOL. AÑADIDO
<0,6mm	25,36cm <sup>3</sup> +24,64cm <sup>3</sup>
0,6-2mm	100cm <sup>3</sup>
2-7mm	53,60cm <sup>3</sup> +46,40cm <sup>3</sup>

C) RF-50: 50% NFU + 50% ALBERO

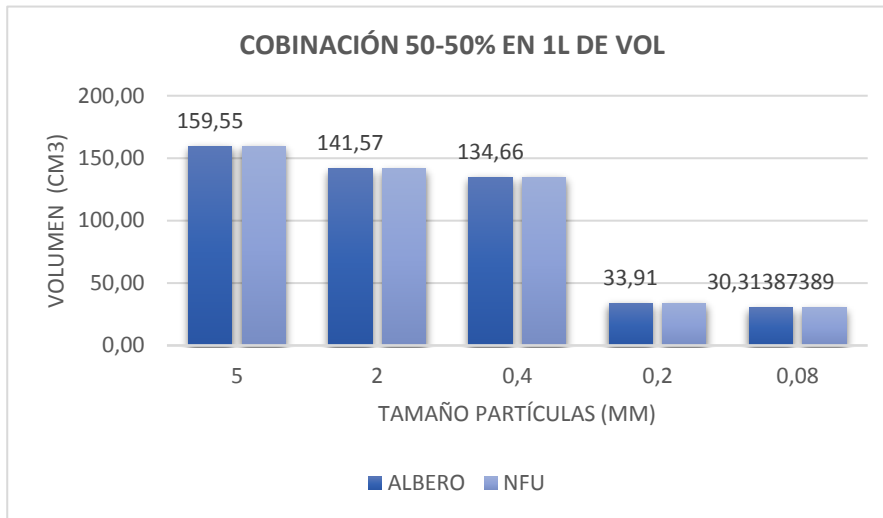


Fig. 20

- Reparto de NFU según su granulometría:

Tabla 8

TAMAÑO NFU	VOL. AÑADIDO
<0,6mm	33,91cm <sup>3</sup> + 30,31cm <sup>3</sup>
0,6-2mm	134,66cm <sup>3</sup>
2-7mm	159,55cm <sup>3</sup> +141,57cm <sup>3</sup>

D) RF-75: 75% NFU +25% ALBERO

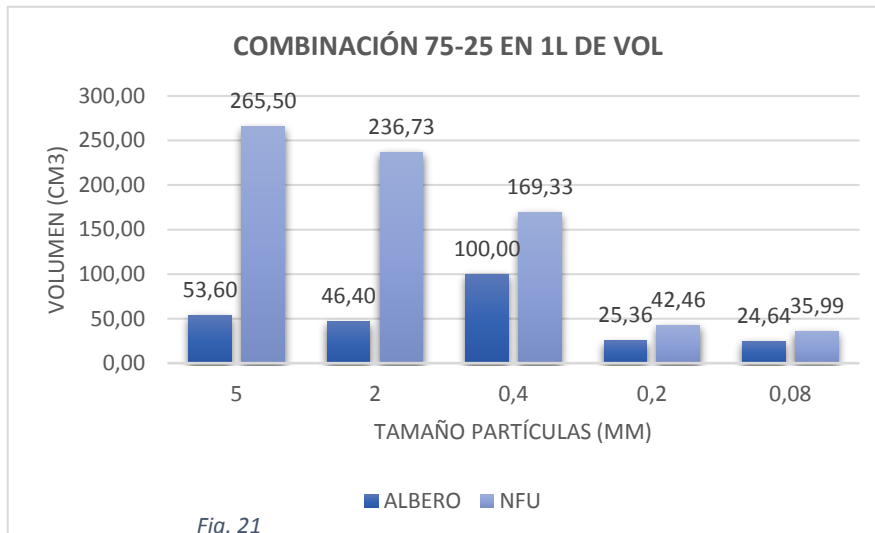


Fig. 21

- Reparto de NFU según su granulometría:

Tabla 9

TAMAÑO NFU	VOL. AÑADIDO
<0,6mm	42,46cm <sup>3</sup> +35,99cm <sup>3</sup>
0,62mm	169,33cm <sup>3</sup>
27mm	265,20cm <sup>3</sup> +236,73cm <sup>3</sup>



## 2.2. CARACTERIZACIÓN DEL COMPUESTO.

Los neumáticos de desecho se pueden usar en aplicaciones de ingeniería geotécnica en lugar de suelos como material de relleno liviano, alta capacidad de absorción de vibraciones, alta compresibilidad elástica, material de capa aislante y material de drenaje. Antes de la aplicación en el campo, es fundamental caracterizar las propiedades de ingeniería y evaluar el rendimiento en función de las pruebas de modelo de laboratorio (Reddy, Krishna, & Reddy, 2018). Para poder caracterizar las diferentes muestras de compuestos realizaremos, una serie de ensayos en el laboratorio:

### → PROCTOR NORMAL. UNE-103-500/94

- Ya con las proporciones calculadas anteriormente, **pasamos a su pesaje y mezcla proporcional** para realizar el ensayo.



Fig. 22

- Dependiendo de la combinación ensayada, se dispondrán cantidades diferentes para ambos materiales. (Fig. 18-21)
- Una vez mezclados los materiales, procedemos a humedecer la muestra (aprox. 4kg). Comenzaremos con un 4% de humedad e iremos incrementando un 3% en siguientes puntos hasta que la densidad baje. (4-5 puntos)

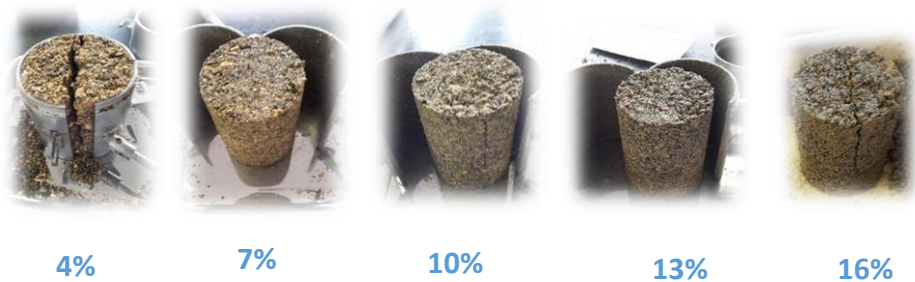


Fig. 23

- Con cada punto de humedad se realizará el ensayo según la norma. Con un número de 26 golpes(Fig.25) en cada una de las 3 tongadas(Fig.24).



Fig. 25



Fig. 25

- Tras calcular la humedad y la densidad de cada punto una vez secada la muestra en las estufa durante 24h, dibujamos la gráfica de la cual obtendremos la densidad máxima y la humedad óptima para cada compuesto ensayado.
  - Observando la Fig.26 y la Tabla 10, podemos apreciar como a medida que aumentamos la fracción de granulado NFU RF añadido a la muestra, la densidad ( $\rho$ ) disminuye de forma que podríamos decir que a mayor cantidad de NFU menor densidad seca, y menor es el peso específico.

Tabla 10

COMPUESTO ENSAYADO	RF NFU (%)	Pmax (g/cm <sup>3</sup> )	Hopt (%)	DESVIACIÓN ESTANDAR%
0	0	2,021	9,24	0
A	10	1,78	10,28	11,92
B	25	1,62	12,38	19,84
C	50	1,34	13,04	33,70
D	75	1,06	14,62	47,55

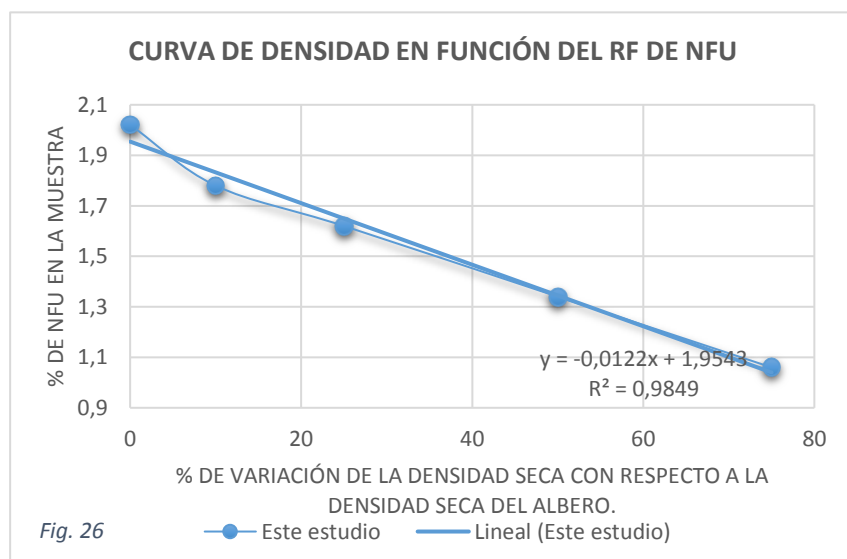


Fig. 26

A continuación, La Fig-27 muestra la relación entre la densidad de masa  $\rho$  y la fracción de caucho RF de las muestras. Se puede observar que en comparación con la muestra de arena inicial (es decir, mezclas sin neumático de caucho triturado,  $RF = 0\%$ ),  $\rho$  de las mezclas de arena y caucho cae notablemente al aumentar la fracción de caucho. (Zhang, Cai, & Duan, 2018)

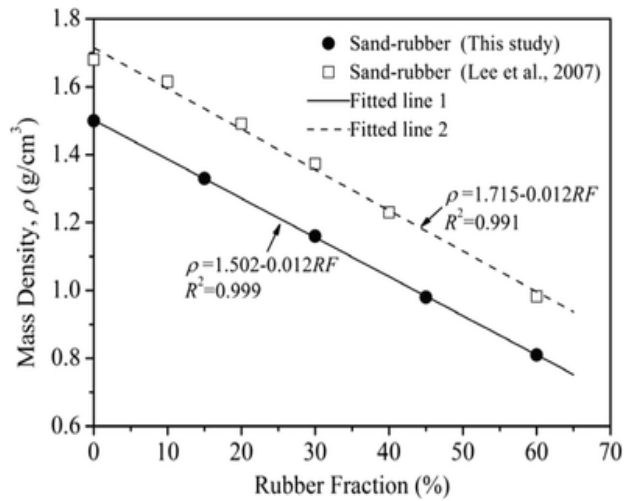


Fig. 27( Zhang, Cai, & Duan, 2018)

Comparando nuestros resultados con los obtenidos en los estudios referenciados anteriormente, podemos percatarnos de un comportamiento muy similar con unas líneas de tendencia con pendiente semejante y con la diferencia de que en el eje y se desfasa sobre las otras dos líneas, por lo que la densidad  $\rho$  de la nuestros compuestos para similares porcentajes de combinación es mayor. Por otra parte podríamos concluir que los ensayos realizados son fiables, ya que el comportamiento obtenido es muy similar a los comparados.

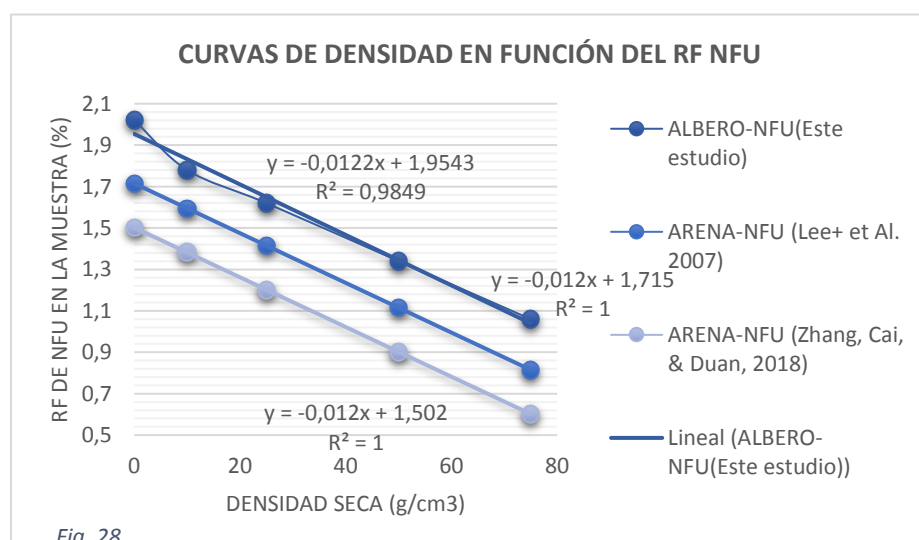


Fig. 28

Finalmente, con este cuadro resumen (Fig.29) de los ensayos de próctor realizados, a modo de observación, es relevante anotar que a medida que aumenta el porcentaje de NFU en la muestra, la humedad óptima a la que el compuesto ensayado alcanza su máxima densidad aumenta de 9,24% para muestras de RF-0% a 14,62% para RF-75.

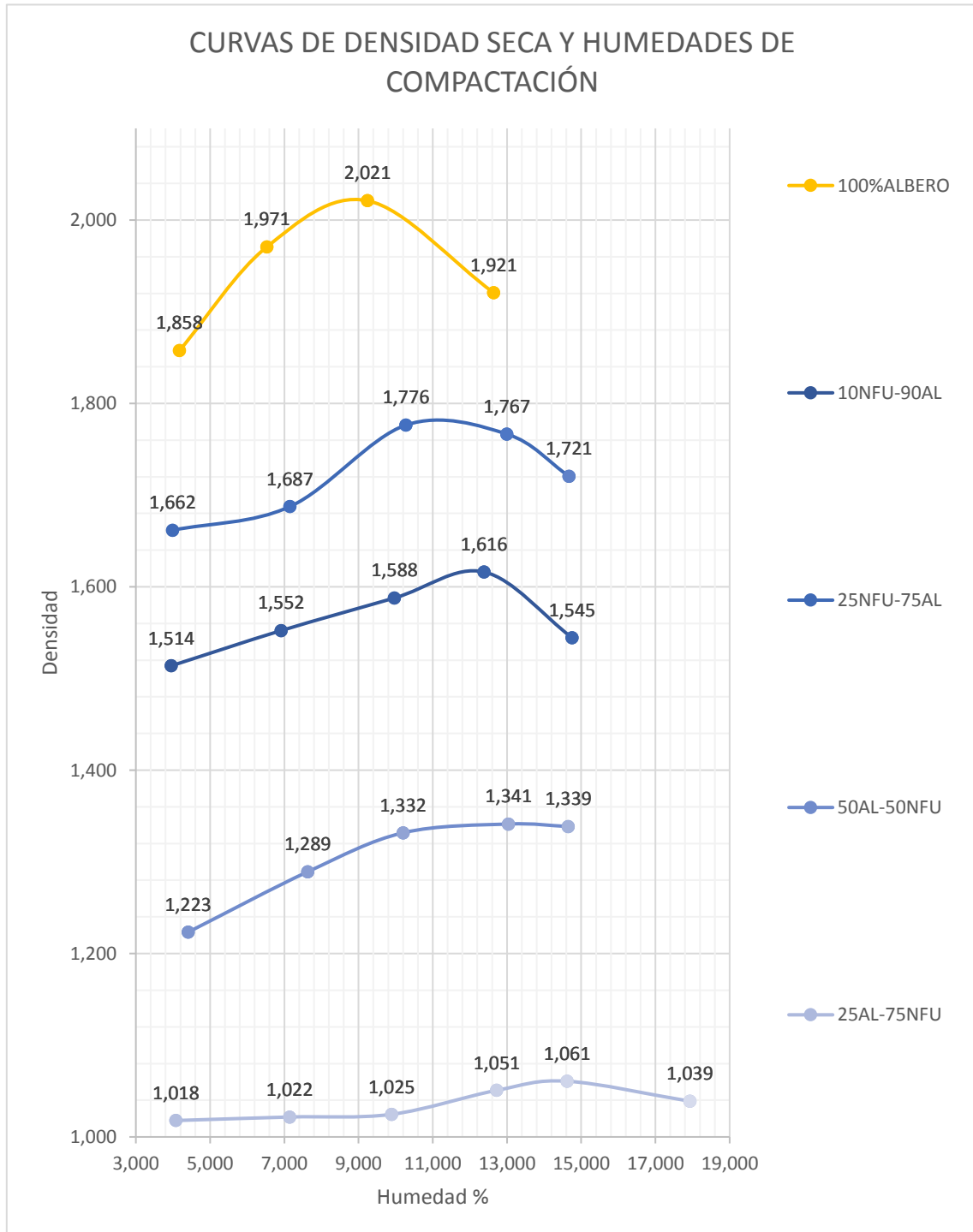
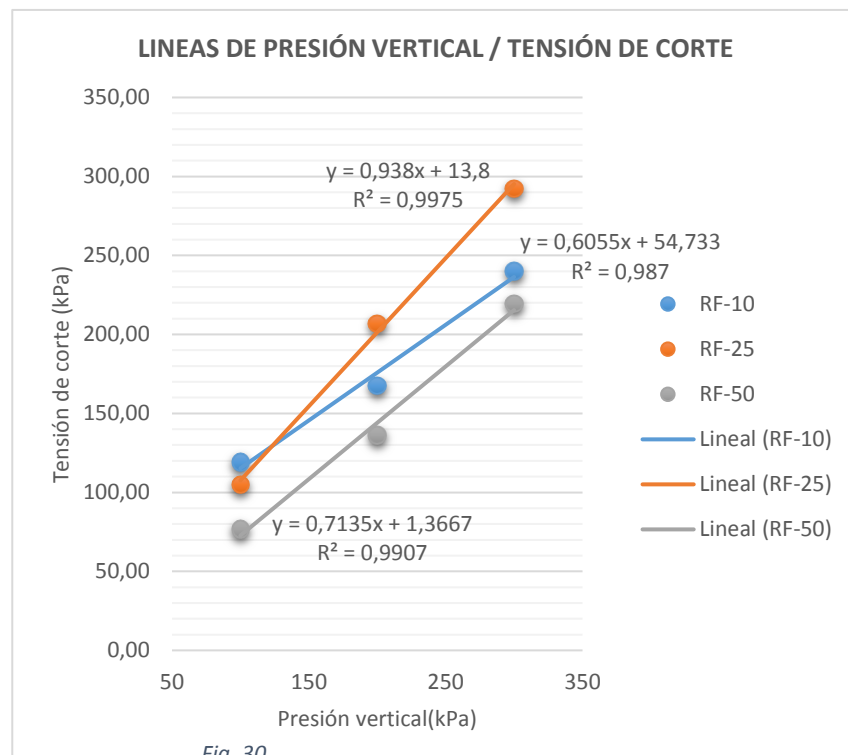


Fig. 29

### → CORTE DIRECTO. *UNE-103-401*

Para la realización de los ensayos de corte directo hemos utilizados el mismo material de los ensayos de próctor pero con la limitación del ensayo según su norma. No se permiten ensayos con granulometrías mayores de 1/10 la altura de la probeta, por lo que debemos pasar la muestra por el tamiz 5mm antes de proceder con el ensayo.

- Lo primero que debemos hacer antes de realizar el ensayo es calcular la cantidad de muestra necesaria y la cantidad de agua a añadir a la muestra para alcanzar la humedad óptima y densidad máxima obtenidas en el ensayo de próctor para cada compuesto ensayado.
- El ensayo a realizar será un ensayo consolidado-drenado (CD). *Se aplica la presión normal, permitiendo el drenaje del suelo hasta finalizar la consolidación primaria. A continuación se procede a la rotura de la probeta a una velocidad lo suficientemente lenta como para que no se originen presiones intersticiales, permitiendo el libre drenaje del agua de los poros. De este ensayo se obtienen los parámetros resistentes efectivos, cohesión efectiva,  $c'$  y ángulo de rozamiento efectivo,  $\Phi'$ .* (*UNE-103-401,1998*)
- Los compuestos ensayados serán RF-10%, RF-25% y RF-50 y se realizaran 3 escalones de carga que irán desde los 100kPa a los 300kPa pasando por 200kPa.



- Con los resultados de los ensayos grafiados en la Fig.30. anteriormente, podemos deducir los parámetros resistentes efectivos, cohesión efectiva,  $c'$  y ángulo de rozamiento efectivo,  $\Phi'$ . Par cada compuesto ensayado, los parámetros efectivos son:

Tabla 11

RF-10		RF-25		RF-50	
$c'$ (Kpa)	$\Phi'$	$c'$ (Kpa)	$\Phi'$	$c'$ (Kpa)	$\Phi'$
54,73	31,19	13,8	43,16	1,37	35,51
Terzaghi $c'=2/3c$	$C=$ 82kPa	Terzaghi $c'=2/3c$	$C=$ 20,7kPa	Terzaghi $c'=2/3c$	$C=$ 1,82kPa
$q_u=2c$	164	$q_u=2c$	41,4	$q_u=2c$	3,64

- Comparando los datos de cohesión obtenidos con la tabla anterior podemos observar como la muestra RF-10 respondería a un material de consistencia media-dura, mientras la las demás muestras corresponderían con un material muy blando dentro de los suelos cohesivos. *Este estudio demuestra que  $\rho$ , ángulo de fricción y  $q_u$ , resistencia a compresión simple, disminuye linealmente con un aumento en la fracción de caucho*(Zhang et al., 2018)

**Suelos cohesivos**

Según Peck, Hanson y Thornburn, *Foundation Engineering* ( 2<sup>nd</sup> edition, 1974) y Joseph Bowles, *Foundation analysis and design*

N	Descripción del material	$\gamma$ saturado, kgf/m <sup>3</sup>	$q_u$ , kgf/cm <sup>2</sup>
0-2	muy blando	1600	0.25
2-4	blando	1600 - 1800	0.50
4-8	medio	1750 - 2100	1.00
8-16	duro	1800 - 2200	2.00
16-32	muy duro	1950 - 2200	4.00

El valor de  $q_u$  dado corresponde a la resistencia no confinada a la compresión, que a su vez está relacionada con la cohesión, C, por la expresión  $q_u = 2C$

Algunos autores como Terzaghi proponen una reducción del valor de C y trabajan con la cohesión efectiva,  $C' = 2/3 C$  para tomar en cuenta fenómenos locales que ocurren en la fundación,

Fig. 31 Peck, Hanson y Thornburn (1974), Bowles(1997)

- Refiriéndonos al ángulo de fricción interna, hemos anotar que los compuestos ensayados presentan propiedades semejantes a: RF-10 (Arena suelta/limos); RF-25 (Arena densa); RF-50 (Arena media)

TABLA 1.3  
ANGULO DE FRICCIÓN INTERNA "a"

Tipo de suelo	$\theta$ ° (grados)
<i>Arena: granos redondeados</i>	
Suelta	27 - 30
Media	30 - 35
Densa	35 - 38
<i>Arena: granos angulares</i>	
Suelta	30 - 35
Media	35 - 40
Densa	40 - 45
Grava con algo de arena	34 - 48
Arcillas consolidadas	20 - 30
Limos	26 - 35

Braja M. Das, 2001

Fig. 32. Braja M. Das, (2001)

- El efecto de la tensión vertical sobre la resistencia al corte es evidente a partir de los resultados de la prueba. La resistencia al corte se incrementa con un aumento de la tensión vertical para una fracción de caucho dada. Este fenómeno se puede atribuir principalmente a la mejora de los contactos de partículas, que a su vez altera el ángulo de fricción aparente y la microestructura de las mezclas. (Zhang et al., 2018)
- Para cada uno de los ensayos obtuvimos las siguientes gráficas (Fig. 33-36) en las cuales podemos observar como a medida que aumentamos el porcentaje de NFU, las características de tensión deformación de los diferentes compuestos de albero caucho varían de frágiles a dúctiles a medida que aumenta la proporción de NFU.

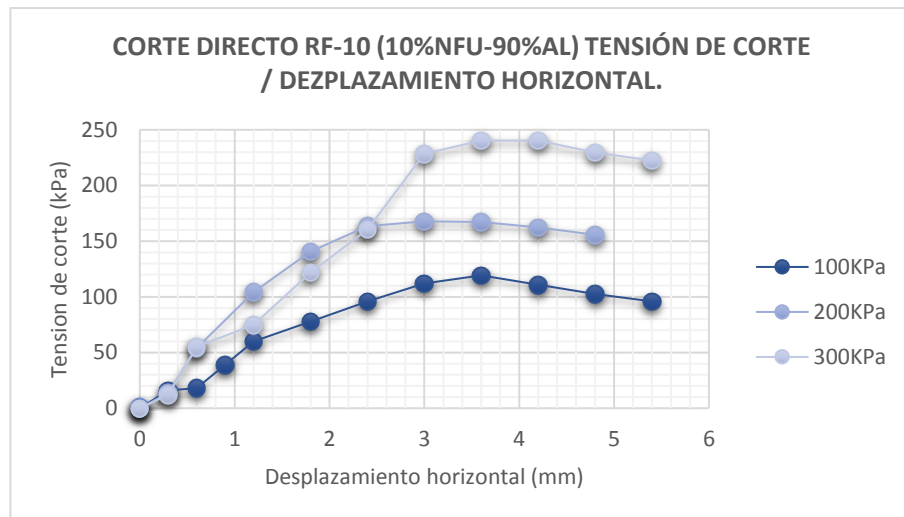


Fig. 34

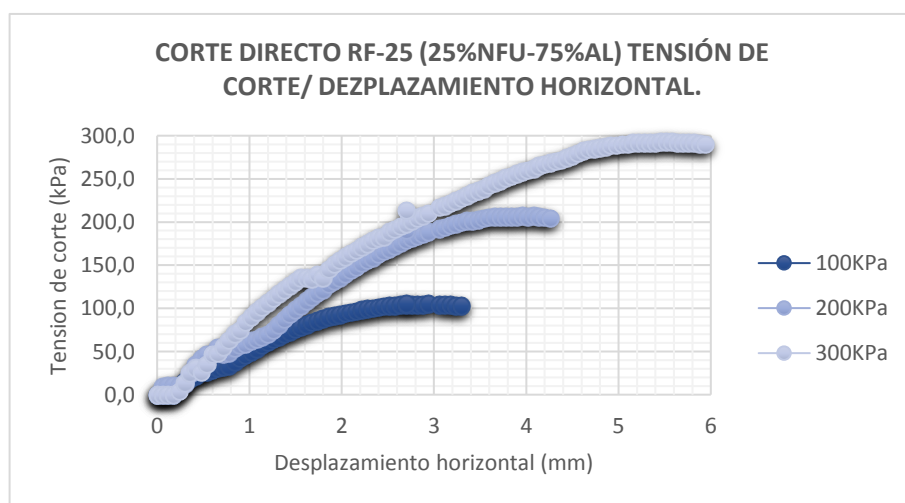


Fig. 33.

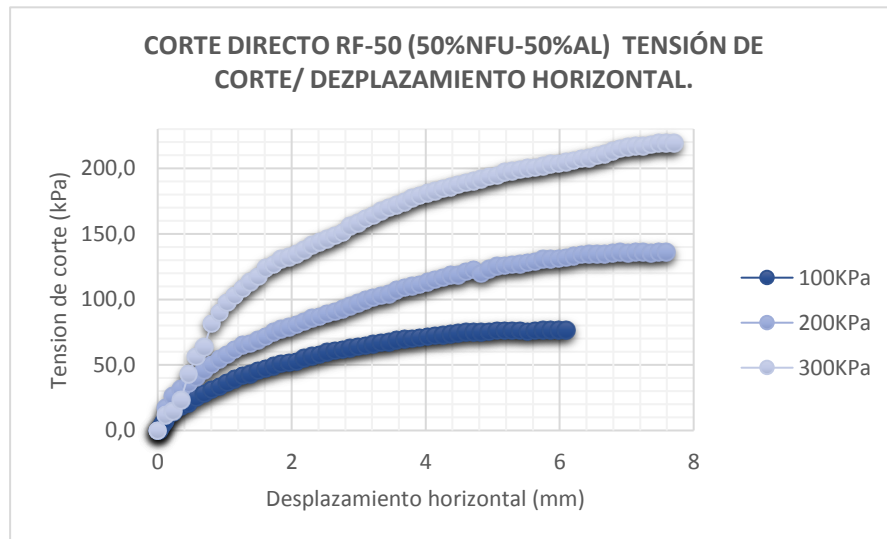


Fig. 36

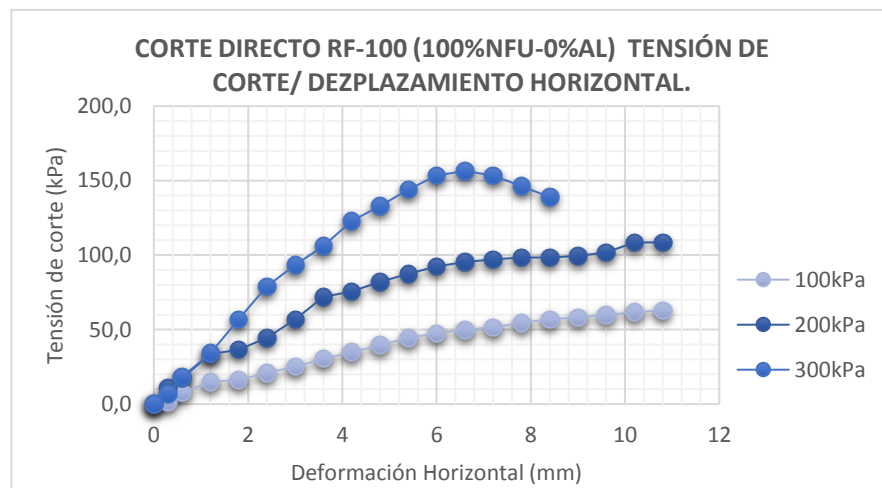


Fig. 35. Tesis Doctoral Elizabeth Contreras. Proyecto GRENECO.

- *Teniendo en cuenta las curvas de tensión –deformación de mezclas de arena-caucho a varias tensiones verticales de Fig.37 y comparándolas con nuestros resultados graficados en las Fig. 38-40 Podemos decir, que en las dos baterías de ensayos se observar que cuando las mezclas no contienen partículas de caucho ( RF = 0%), las mezclas exhiben características frágiles en términos de caída rápida en el esfuerzo post-pico con el aumento del desplazamiento de corte. Con el aumento de la fracción de caucho, las mezclas de caucho y arena se comportan como un material dúctil, mostrando una caída gradual en la tensión post-pico con la tensión de cizallamiento. (Zhang et al., 2018)*



Además, tanto del ejemplo como de nuestros resultados, podemos sacar la conclusión de que cuanto mayor es el contenido de NFU menor es la resistencia máxima al cizallamiento. *El decremento de la resistencia al corte se puede atribuir principalmente a la adición de partículas de caucho blando, causando una pérdida de rigidez en las mezclas.* (Zhang et al., 2018)

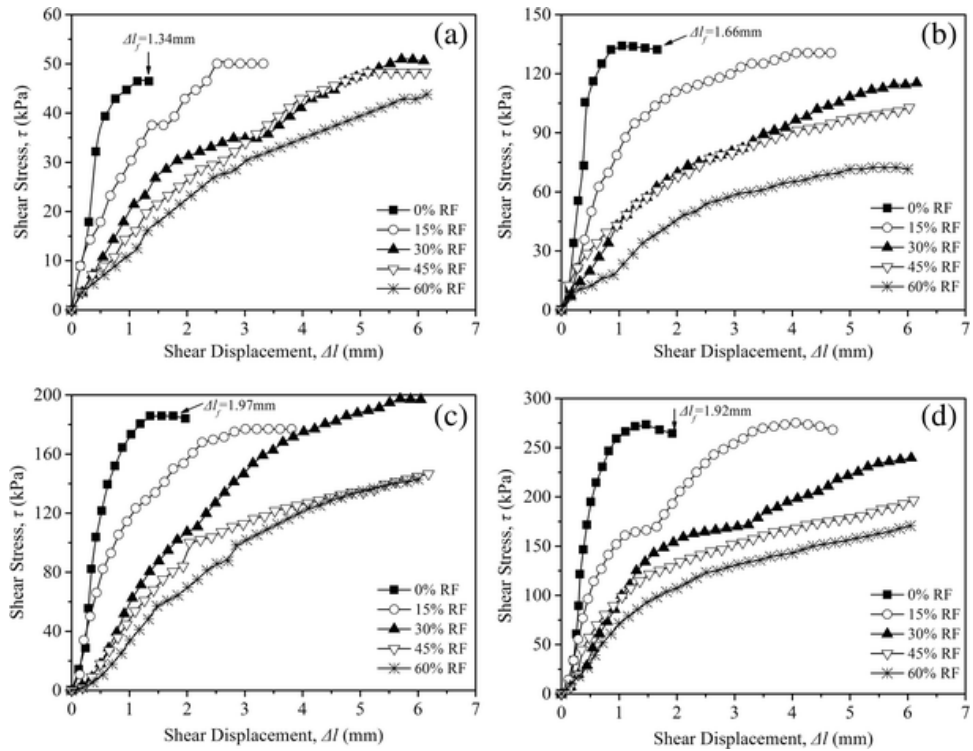


Fig. 38

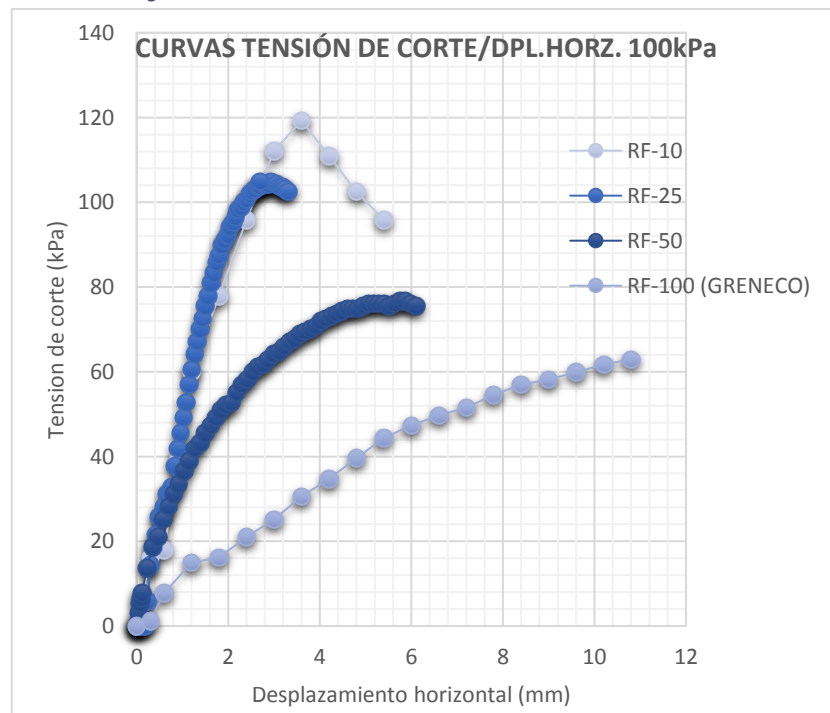


Fig. 37

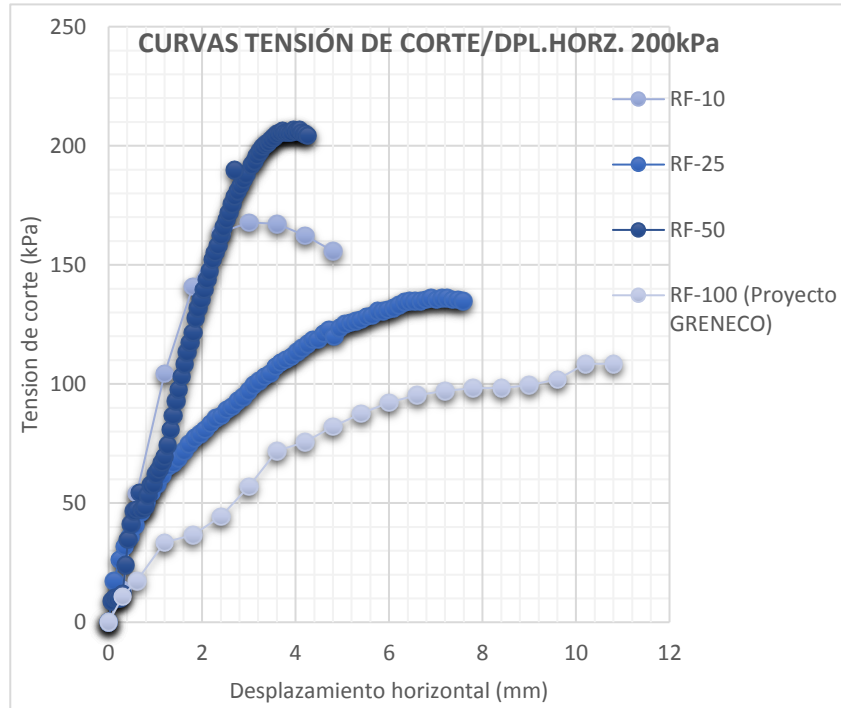


Fig. 40

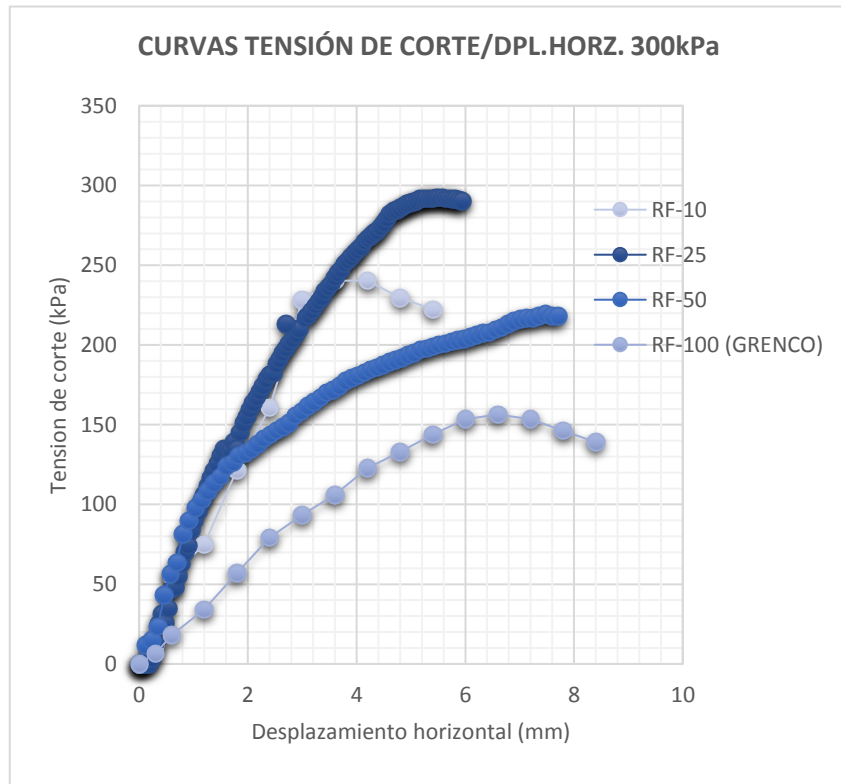


Fig. 39

### → ENSAYO DE EDMETRÍA. (UNE-103-405-94)

Para la realización de los ensayos de edometría hemos utilizados el mismo material de los ensayos de próctor y corte directo pero con la limitación del ensayo según su norma, no se permiten ensayos con granulometrías mayores de 1/3 la altura h (2cm) de la probeta, por lo que debemos pasar la muestra por el tamiz z 5mm antes de proceder con el ensayo.

- Lo primero que debemos hacer antes de realizar el ensayo es calcular la cantidad de muestra necesaria y la cantidad de agua a añadir a la muestra para alcanzar la humedad óptima y densidad máxima obtenidas en el ensayo de próctor para cada compuesto ensayado.
- Cada ensayo será realizara con los siguientes escalones de carga y descarga:
  - CARGA: 5-10-20-50-100-200-500-1000-1500kPa.
  - DESCARGA: 100-10-0kPa.
- Los compuestos ensayados serán RF-10%, RF-25% ya que son los que presentan mejores resultados en los ensayos realizados anteriormente.

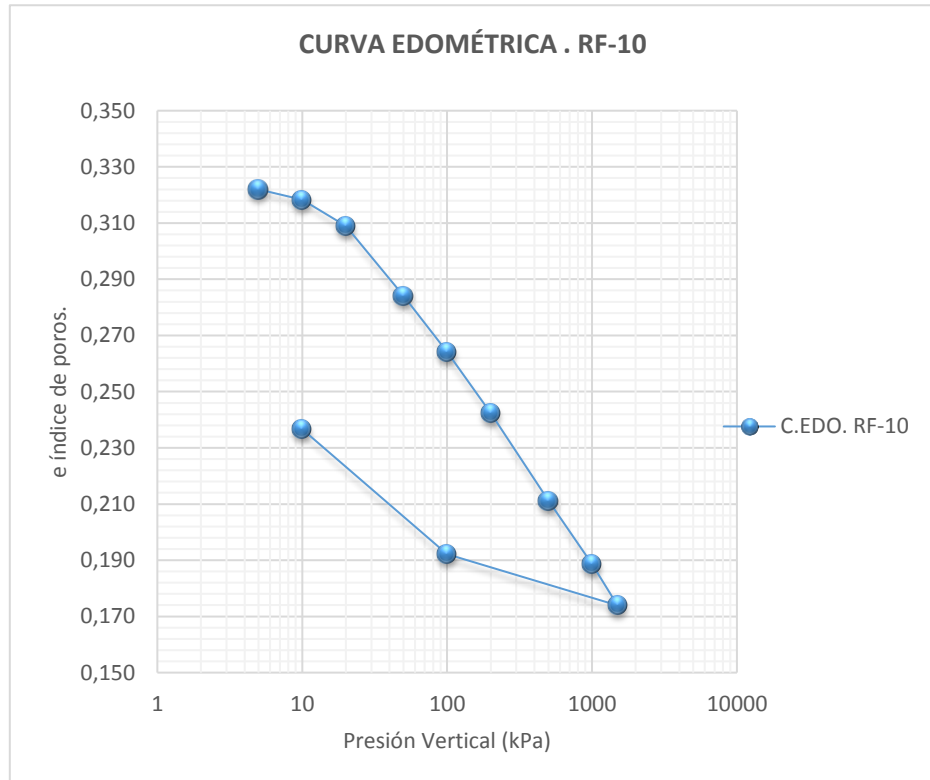


Fig. 41

- **Cc** (índice de compresión)= **0,6**; - **Cs**(índice de hinchamiento)= **0,4**

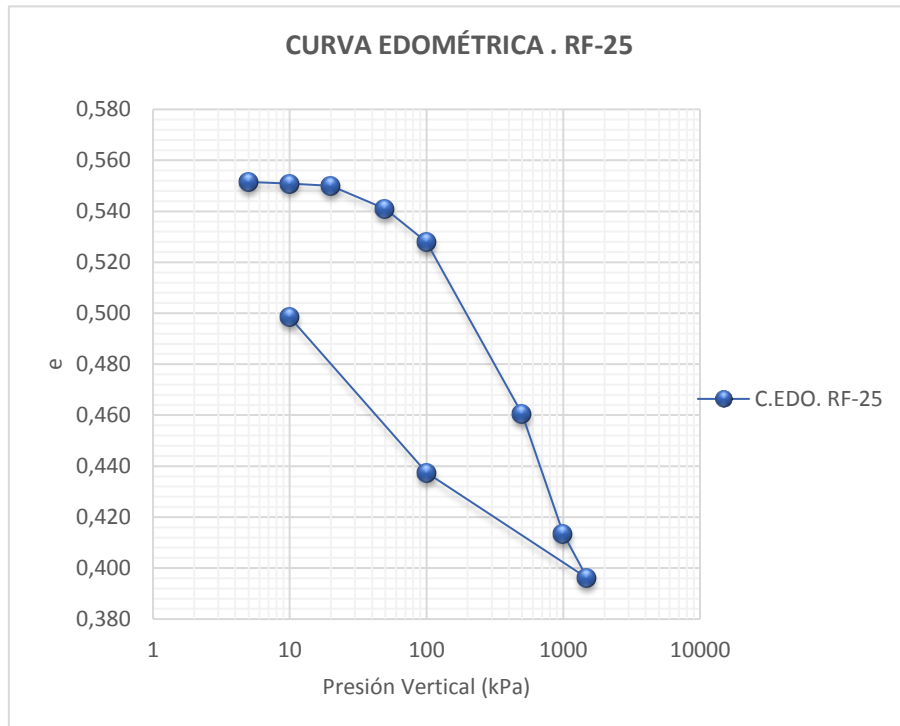


Fig. 42

- $C_c$  (índice de compresión)= **0,8**; -  $C_s$ (índice de hinchamiento)= **0,7**
- Comparando ambos gráficos de las Fig.43 podríamos concluir, que cuanto mayor es el contenido de NFU en el compuesto, mayor es el índice de poros ( $e_0$ ). También cabe decir que ambos ensayos presentan una línea de descarga muy pronunciada que denotan cierto comportamiento elástico.

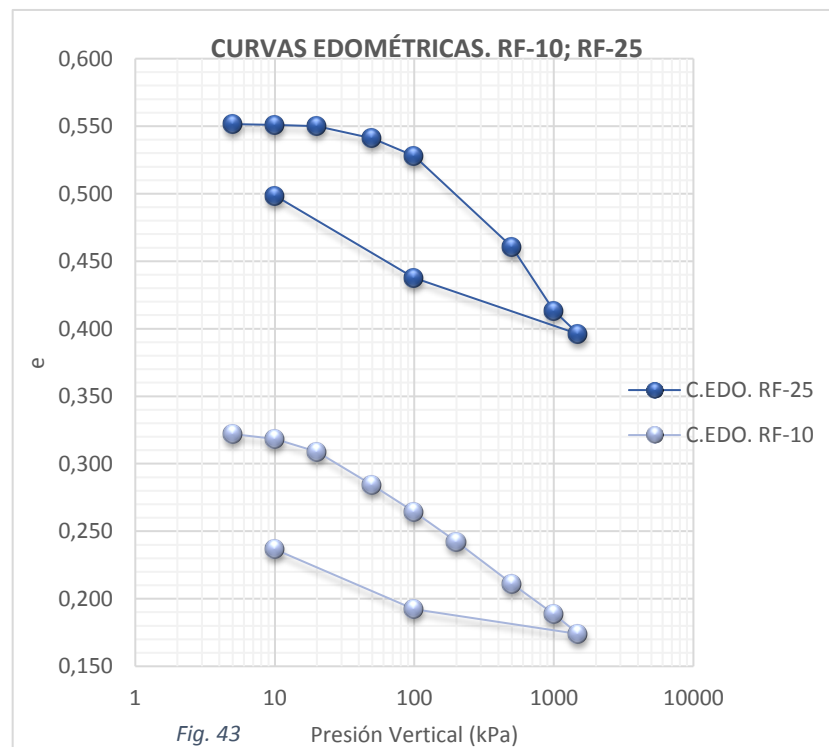


Fig. 43

- Finalmente, si comparamos el porcentaje de recuperación de la muestra a partir del  $C_c$  y del  $C_s$ , de forma que si  $C_c$  es el 100%,  $C_s$  será en porcentajes lo que el compuesto dado será capaz de recuperar tras la descarga, observaremos que cuanto mayor es el contenido de caucho, mayor es el % de recuperación de la muestra.

Tabla 12

COMPUESTO	$C_c$	$C_s$	% RECUPERACIÓN
RF-10	0,6	0,4	66,7%
RF-25	0,8	0,7	87,5%

- Con estos valores de recuperación, cabría decir, que nos encontramos ante compuestos con comportamientos elásticos que permiten al suelo recuperar prácticamente su estado natural. De esta forma se cumple uno de los requerimientos idóneos de un suelo, la elasticidad.

### 2.3.APLICACIONES PARA EL NFU Y EL COMPUESTO ENSAYADO.

Debido al menor peso unitario, la baja relación de vacíos y la alta resistencia al cizallamiento de las mezclas de chips de neumáticos de arena junto con su amplia disponibilidad, se han utilizado como relleno liviano para aplicaciones geotécnicas como el relleno detrás del muro de retención, los pilares de puentes, los cimientos y los terraplenes. Debido a la mayor proporción de huecos de las virutas de neumáticos solo, se han utilizado como capas de drenaje en numerosos proyectos de terraplenes de carreteras y rellenos sanitarios, y detrás de pilares de puentes / muros de contención. (Reddy et al., 2018). A continuación se discute la aplicabilidad de los geomateriales de NFU en aplicaciones geotécnicas.

#### ➔ CARRETERAS, TERRAPLENES, RELLENOS LOCALIZADOS Y RELLENOS TODO EN UNO.

Este conjunto de aplicaciones requieren de una gran cantidad de material para llevarse a cabo, por este motivo es un marco idóneo para implantar materiales reciclados como el NFU y mezclas de tierra y NFU y de esta forma resolver problemas geotécnicos y ambientales.

- **TERRAPLENES:**

- Esta unidad consiste en la extensión y compactación, por tongadas, de los materiales cuyas características se definen en el apartado 330.3 de este artículo, en zonas de tales dimensiones que permitan de forma sistemática la utilización de maquinaria pesada con destino a crear una plataforma sobre la que se asiente el firme de una carretera. (PG3-Carreteras, Parte 3, 2001)
- Las exigencias para terraplenes dependen de:

**Clasificación de una muestra de suelo según el  
Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras  
de Carreteras y Puentes. PG-3**

Materia orgánica	MO	0 %
Sales solubles	SS	0 %
Yeso	Yeso	0 %
Resto sales solubles	Resto SS	0 %
Tamaño máximo	Dmax	10 mm
Cernido por el tamiz 20 UNE	# 20	100 %
Cernido por el tamiz 2 UNE	# 2	44,72 %
Cernido por el tamiz 0,40 UNE	# 0,40	20 %
Cernido por el tamiz 0,080 UNE	# 0,080	8,94 %
Límite Líquido	LL	0 %
Índice de Plasticidad	IP	0 %
Asiento ensayo de colapso	A. Colapso	no %
Hinchamiento libre	H. libre	no %

Fig. 44

- Con todos estos datos (Fig.44) del compuesto o material y cumpliendo los las siguientes premisas (Fig.45), se determinará si los compuestos ensayados son válidos. Es de vital importancia saber que para todos nuestros compuestos los datos objeto de cumplimiento son iguales, por lo que solo es suficiente una sola comprobación.

Terraplen		SI
# 20 > 70 %	SI	
# 0,080 >= 35 %	NO	

Suelos seleccionados		SI
MO < 0,2 %	SI	
SS < 0,2 %	SI	
Dmax <= 100 mm	SI	
# 0,40 <= 15 %	NO	
# 2 < 80 %	SI	
# 0,40 < 75 %	SI	
# 0,080 < 25 %	SI	
LL < 30	SI	
IP < 10	SI	

Suelos adecuados		SI
MO < 1 %	SI	
SS < 0,2 %	SI	
Dmax <= 100 mm	SI	
# 2 < 80 %	SI	
# 0,080 < 35 %	SI	
LL < 40	SI	
LL > 30	NO	
IP > 4	NO	

Suelos tolerables		SI
MO < 2 %	SI	
Yeso < 5 %	SI	
Resto SS < 1%	SI	
LL < 65	SI	
LL > 40	NO	
IP > 0,73 · (LL - 20)	SI	
A. Colapso < 1 %	SI	
H. Libre < 3 %	SI	

Suelos marginales		SI
MO < 5 %	SI	
H. Libre < 5 %	SI	
Si LL > 90 entonces IP > 0,73 · (LL - 20)	NO	

Suelos inadecuados		NO
El resto		

Fig. 45

- Como podemos observar en el gráfico anterior nuestros compuestos son válidos para su uso en terraplenes.
- *Las propiedades de los neumáticos de desecho, como la durabilidad, la resistencia, la resistencia y la alta resistencia a la fricción son favorables para el uso en terraplenes de carreteras...Los terraplenes construidos con mezclas de virutas de suelo y neumático pueden tener pendientes más pronunciadas debido a que el relleno tiene una mayor resistencia al corte y un menor peso unitario. Las pendientes laterales más escarpadas disminuyen el volumen de material necesario.(Reddy et al., 2018)*
- RELLENOS LOCALIZADOS:
  - *Esta unidad consiste en la extensión y compactación de suelos, procedentes de excavaciones o préstamos, en relleno de zanjas, trasdós de obras de fábrica, cimentación o apoyo de estribos o cualquier otra zona, que por su reducida extensión, compromiso estructural u otra causa no permita la utilización de los mismos equipos de maquinaria con que se lleva a cabo la ejecución del resto del relleno, o bien exija unos cuidados especiales en su construcción.(PG3-Carreteros,Parte 3, 2001)*
  - Se utilizarán solamente suelos adecuados y seleccionados según el apartado 330.3 de este Pliego. Como todos nuestros compuestos ensayados poseían características de suelo

seleccionado, todas las combinaciones son útiles para dicha aplicación.

- RELLENOS TODO EN UNO:

- *Esta unidad consiste en la extensión y compactación por tongadas de materiales, cuyas características serán las indicadas en el apartado 333.4 de este artículo, con destino a crear una plataforma sobre la que se asienten la explanada y firme de una carretera. El área de trabajo será suficiente para el empleo de maquinaria pesada.(PG3-Carreteros,Parte 3, 2001)*

- Los materiales aplicables a este uso tienen que ser:

O materiales cuyo contenido en finos (material que pasa por el tamiz 0,080 UNE) es inferior al treinta y cinco por ciento (35%) y cuyo contenido de partículas que pasen por el tamiz 20 UNE es inferior o igual al setenta por ciento (70%) y superior o igual al treinta por ciento (30%), según UNE 103101.

O Materiales cuyo contenido en peso de partículas que pasan por el tamiz 20 UNE es inferior al treinta por ciento (30%), pero tienen un contenido en finos (material que pasa por el tamiz 0,080 UNE) superior o igual al diez por ciento (10%) según UNE 103101.

- Si observamos la [Fig.44](#) donde aparecen los parámetros a tener en cuenta para la clasificación de suelos, podemos ver que el porcentaje de partículas que pasa por el tamiz 20 e superior al 70% por lo que los compuestos nos son válidos para esta aplicación.

- RELLENOS DE MURO DE CONTENCIÓN.

- *Los geomateriales STD son materiales ligeros y de alta resistencia al corte), por lo que producen una baja presión horizontal en la parte posterior de los muros de contención. Además, son materiales de drenaje libre, lo que proporciona un drenaje efectivo y no permite la acumulación de ningún exceso de presión de agua de poros detrás de la pared. Utilizaron virutas de neumáticos solo como relleno del muro de contención y lograron mayores factores de seguridad contra deslizamientos y vuelcos en comparación con el uso de arena como relleno.(Reddy et al., 2018).*



- Como Ejemplo de esta aplicación, disponemos de una caso práctico desarrollado en el Castillo de Utrera, donde el doctor Antonio Jaramillo Morilla, ha llevado a cabo el relleno de un muro de contención con granulado de NFU RF-100% que ha reducido los empujes, ha mejorado el drenaje y también ha facilitado la puesta en obra de dicho elemento debido a su reducido peso específico.



Fig. 46



Fig. 47

- Es importante recordar que como el caucho tiene un gran resiliencia, es importante acabar el relleno con una capa de tierra que introduzca una pre-carga en el caucho para que ante posibles esfuerzos se comporte mejor. Esto se debe a que como podemos observar en las gráficas de edometría. Fig.43 Para que la muestra comience a comportarse de una forma más lineal durante la carga, debe superar un tramo de precarga o pre-consolidación donde las deformaciones pueden ser más acusadas y el comportamiento del material es menos predecible.

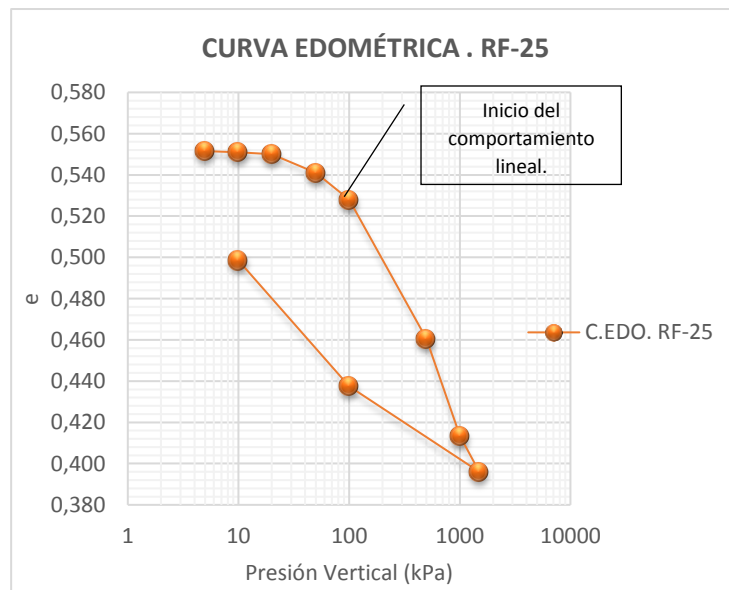


Fig. 48

### 3. CONCLUSIONES.

En base a los resultados reportados anteriormente en los cuales se ha realizado un análisis (propiedades mecánicas y densidad de masa) y diseño de diferentes compuestos de albero y granulado de NFU con diferentes proporciones extraemos estas conclusiones:

- (1) Al aumentar la fracción de caucho RF de las muestras, la densidad de masa descendió linealmente, esto se debe a la bajo peso específico del NFU.
- (2) Para alcanzar la densidad de máxima compactación, las muestras que más porcentaje de caucho tienen, requieren de una catidad mayor de agua.
- (3) En lo que se refiere a la resistencia al corte, se observó que a medida que aumentamos el porcentaje de caucho las muestras disminuyen su resistencia al corte. Los ángulos de rozamiento interno descendieron con el aumento de caucho, pero permanecieron altos, mientras que la cohesión descendió de forma considerable para sorpresa nuestra ya que al ser el caucho un materia cohesivo y el albero presentarse como una arena limosa SL con un 15% de limo que aporta una cierta cohesión a éste, supusimos previamente a los ensayos que el parámetro de la cohesión aumentaría con el aumento de la fracción del caucho.
- (4) Observando la curva de tensión de corte-deformación, podemos afirmar que mientras que para las muestras con bajo porcentaje de caucho el comportamiento de rotura se presenta frágil y la curva desciende de una forma pronunciado, en otras palabras podrimos decir que el punto de ruptura y el pico máximo apenas difieren, sin embargo a medida aumentamos la fracción de caucho, el pico máximo se aleja cada vez más del punto de ruptura dibujando una gráfica menos pronuniciad y tendiendo hacia la horizontalidad, todo esto indica que el aumento de granulado de NFU le proporciona ductilidad a la muestra. A mayor caucho, mayor ductilidad.
- (5) Finalmente y cuanto a lo que consolidación se refiere, los compuestos denotaron tener porcentaje de recuperación de volumen mayor a medida que se aumentó la fracción de caucho por lo concluimos que al aumentar la el porcentaje de caucho de la muestra conseguimos materiales más elásticos.

#### 4. IDEAS PARA AMPLIAR EL TRABAJO DESARROLLADO.

Siguiendo esta línea de investigación y teniendo en cuenta los límites temporales de este trabajo fin de grado, en el futuro se sugiere realizar un mayor número de ensayos que permitan caracterizar fiablemente y con un mayor respaldo de ensayos las propiedades mecánicas de cizallamiento y consolidación, contrastando de esta forma los resultados obtenidos en este estudio.

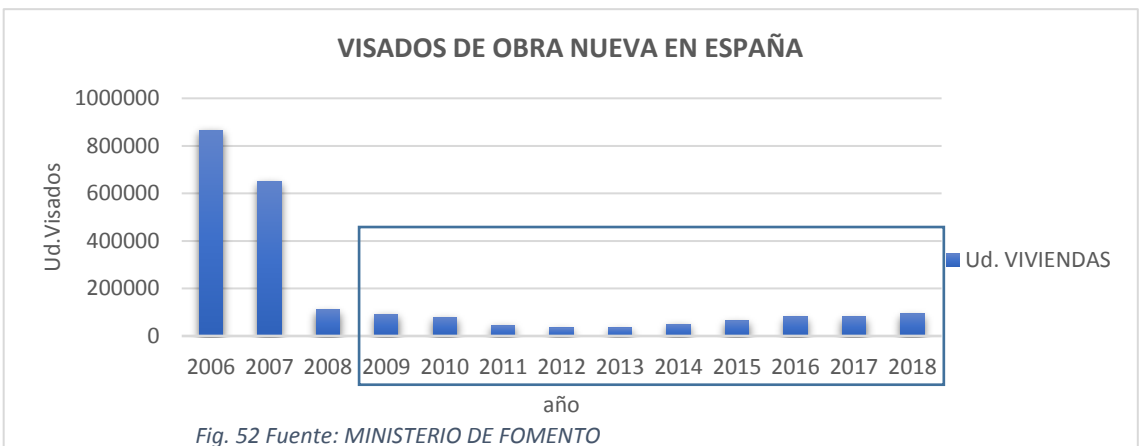
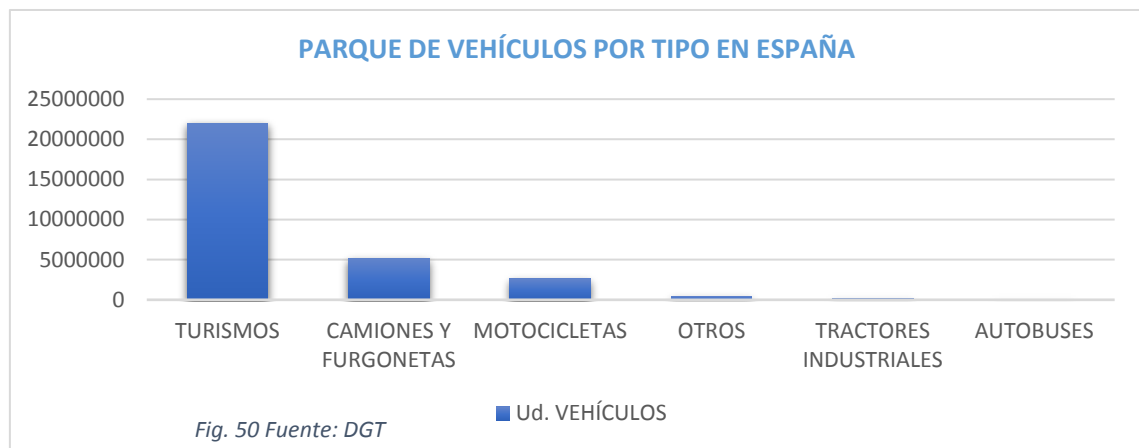
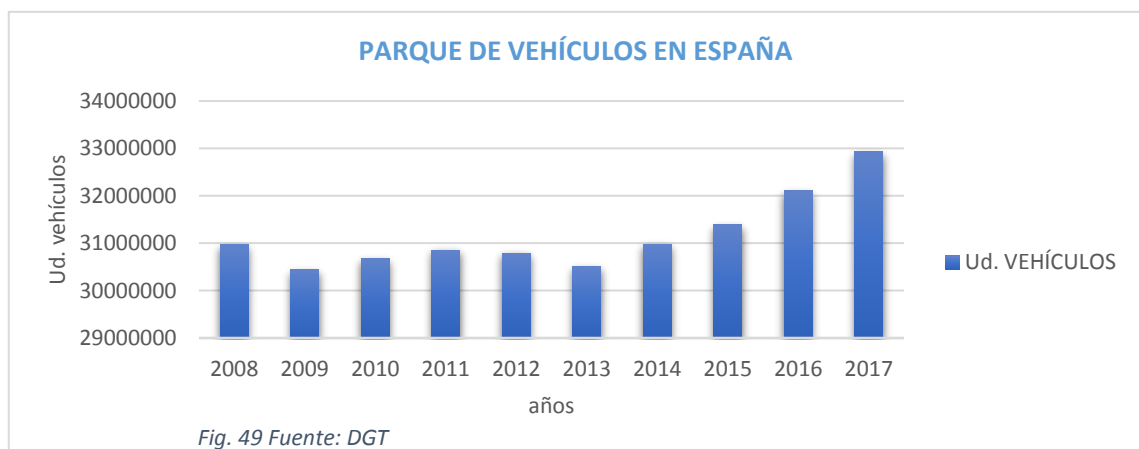
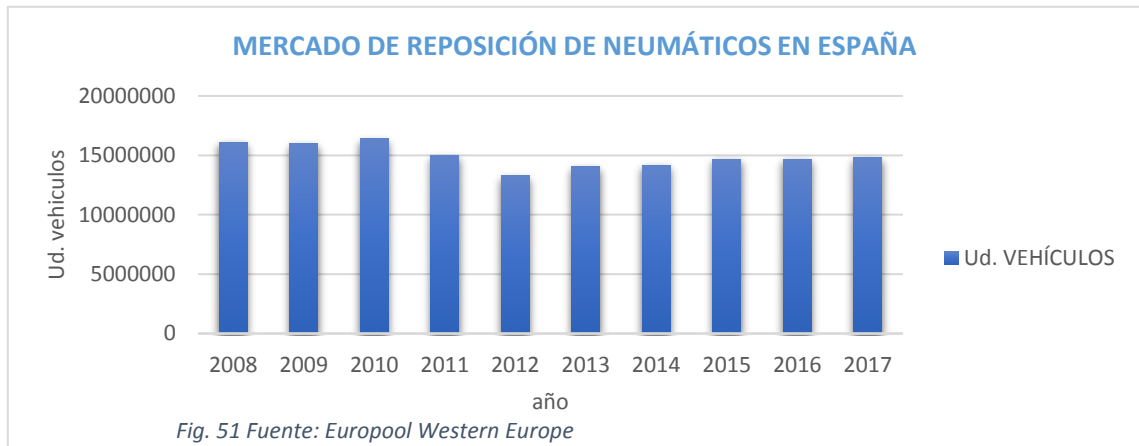
Por otra parte y teniendo en cuenta la pérdida de cohesión de las muestras al aumentar el porcentaje de caucho, sería de vital interés realizar un estudio del comportamiento que tienen la forma y la orientación de las partículas de granulado de NFU en las propiedades mecánicas de los diferentes compuestos.

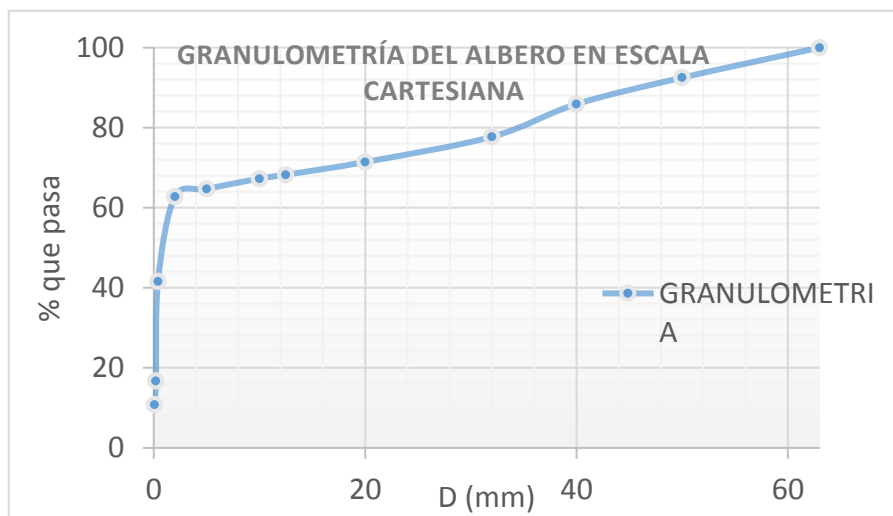
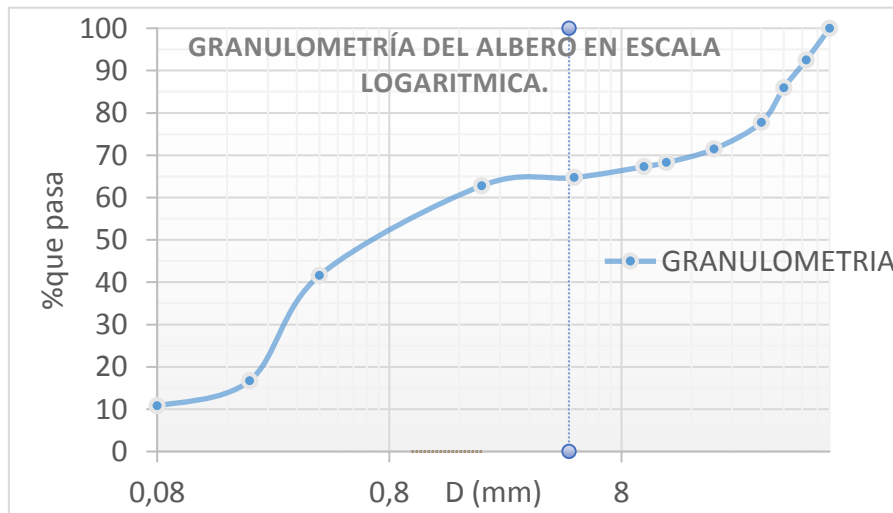
Finalmente y siguiendo con la catalogación de comportamientos del granulado de caucho fuera de uso, se podría proceder del mismo modo que este estudio, pero mezclado el caucho con otros materiales como por ejemplo podrían ser las arcillas.

## 5. BIBLIOGRAFÍA.

- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design. Engineering Geology* (Vol. 20). [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(84\)90010-3](https://doi.org/10.1016/0013-7952(84)90010-3)
- Das, Braja M. Fundamentos de ingeniería geotécnica Cuarta edición (2001) ISBN: 978-607-519-373-1
- Lee, J.-S., Dodds, J., & Santamarina, J. C. (2007). Behavior of Rigid-Soft Particle Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(2), 179–184. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2007\)19:2\(179\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:2(179))
- PG3.Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carretera y puentes. Capítulo 300, explanaciones. 2001.
- Proyecto GRENECO. Doctorado Elizabeth Conteras Marín.
- Reddy, S. B., Krishna, A. M., & Reddy, K. R. (2018). Sustainable Utilization of Scrap Tire Derived Geomaterials for Geotechnical Applications. *Indian Geotechnical Journal*, 48(2), 251–266. <https://doi.org/10.1007/s40098-017-0273-3>
- Serrano, E., García, L., & Fraile, M. (2007). Valorización Material Y Energética De Neumáticos Fuera De Uso ISBN: 978-84-611-8343-2. CEIM Dirección General de Universidades e Investigación.
- UNE-103-401. Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cíclico de una muestra de suelo en la caja de corte directo. (1998).
- UNE-103-405-94. geotécnica: ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro.(1994).
- UNE-103-500-94. Geotecnia, Ensayo de compactación, Próctor normal. (1994)
- UNE-EN 933-1-2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
- Zhang, T., Cai, G., & Duan, W. (2018). Strength and microstructure characteristics of the recycled rubber tire-sand mixtures as lightweight backfill. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(4), 3872–3883. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0742-3>

## 6. ANEXO DE GRÁFICAS.





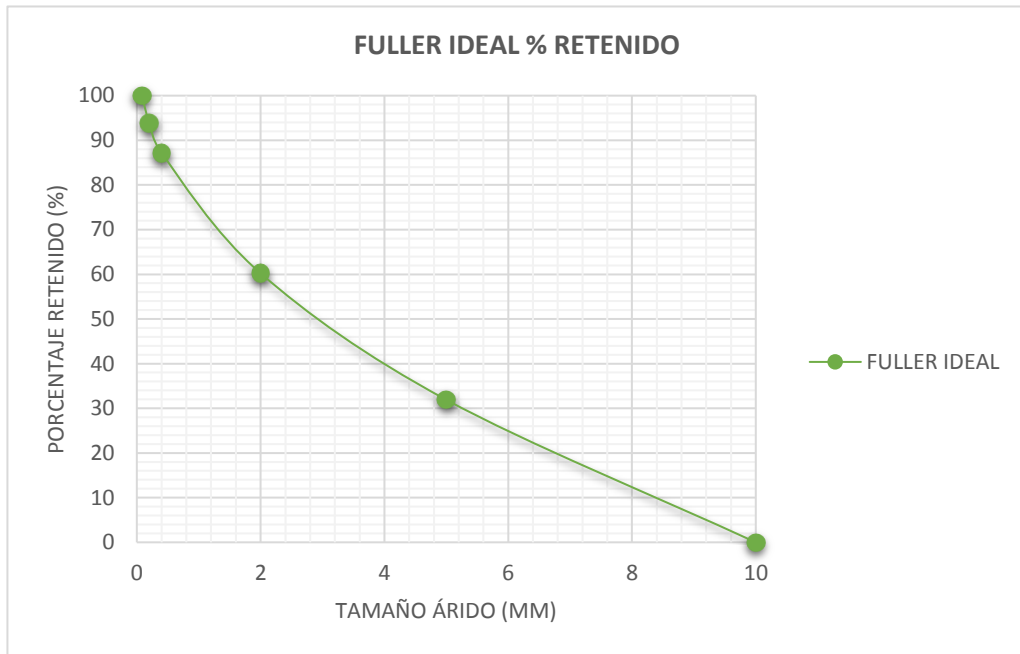


Fig. 56

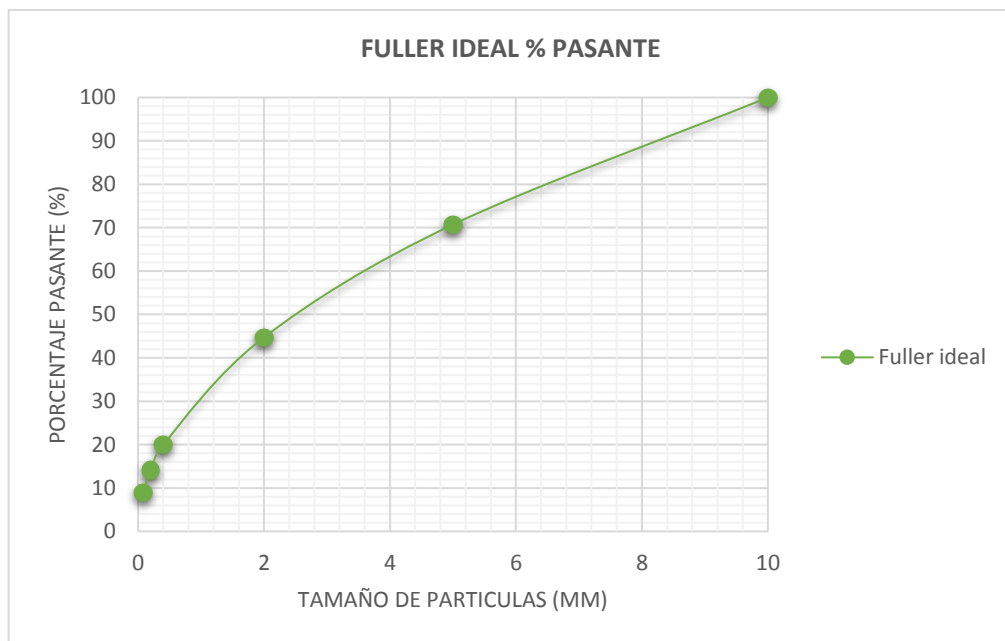


Fig. 57

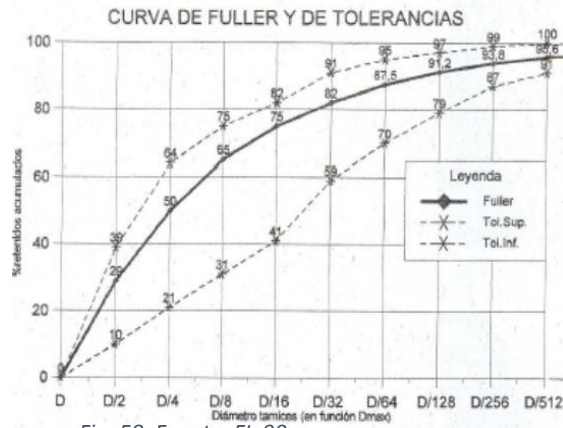


Fig. 58. Fuente: FL-90

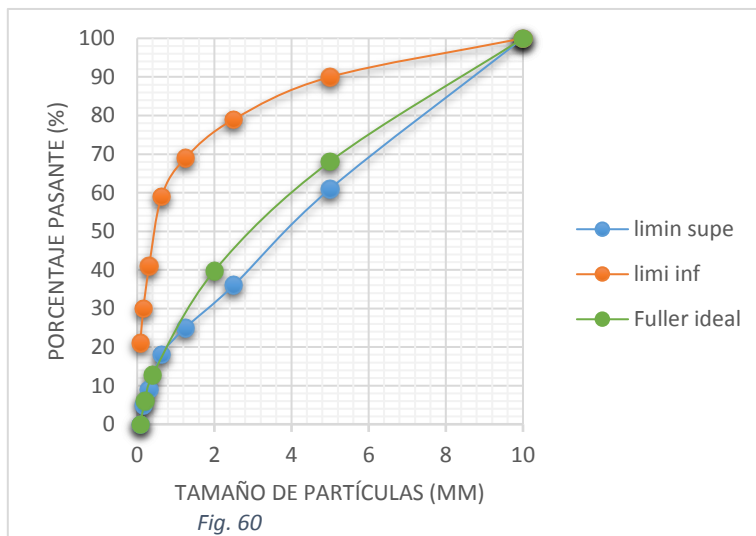


Fig. 60

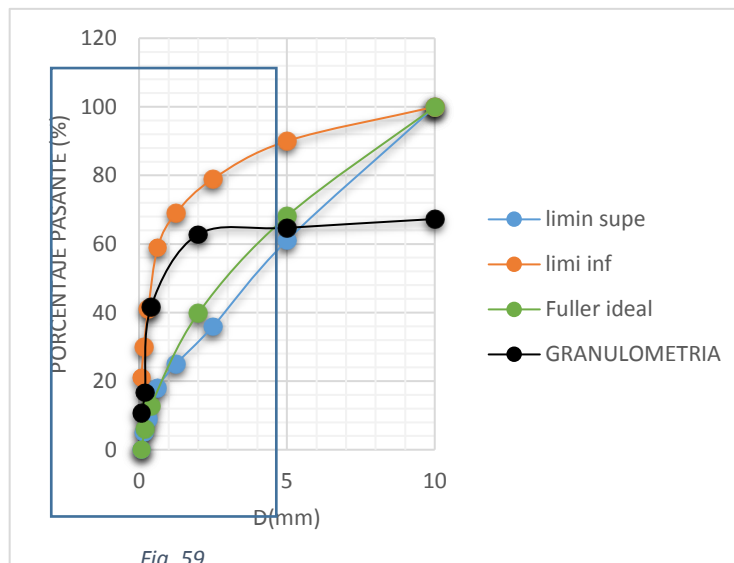


Fig. 59



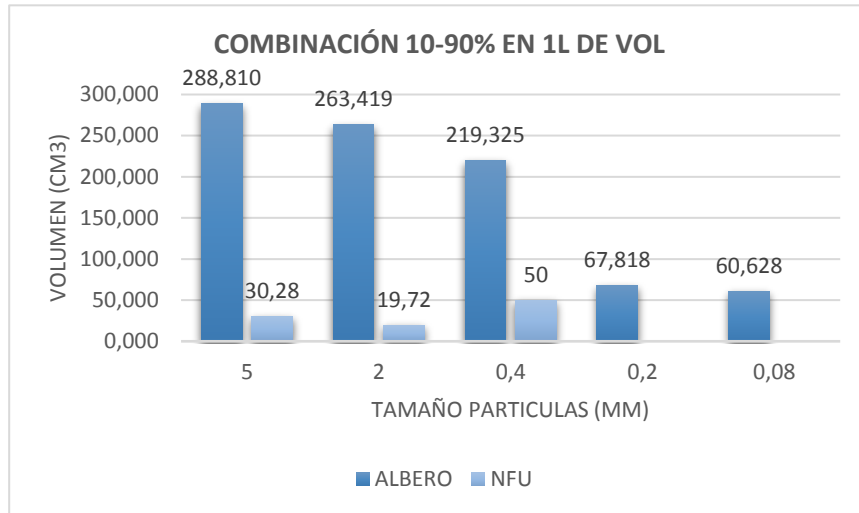


Fig. 63

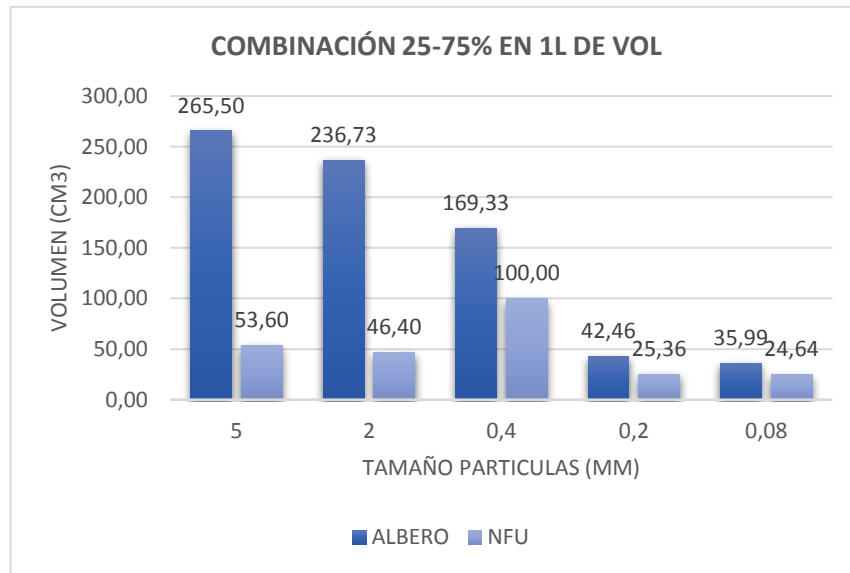


Fig. 62

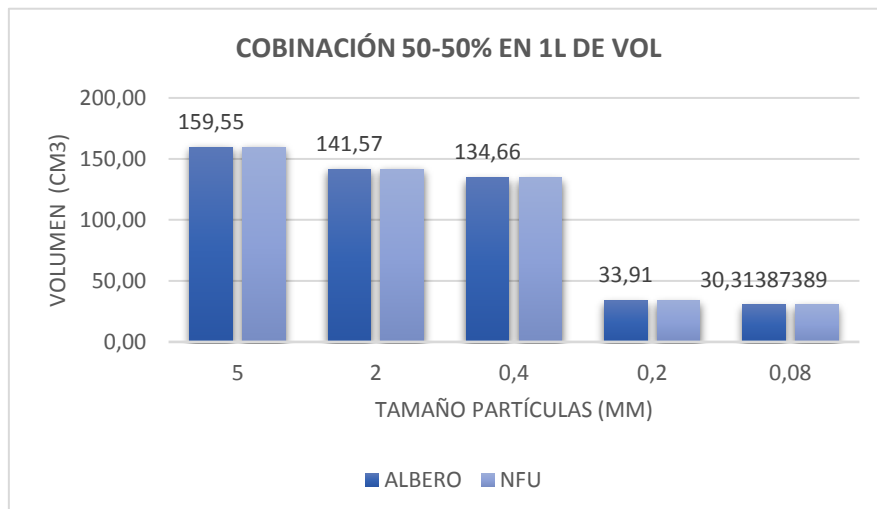
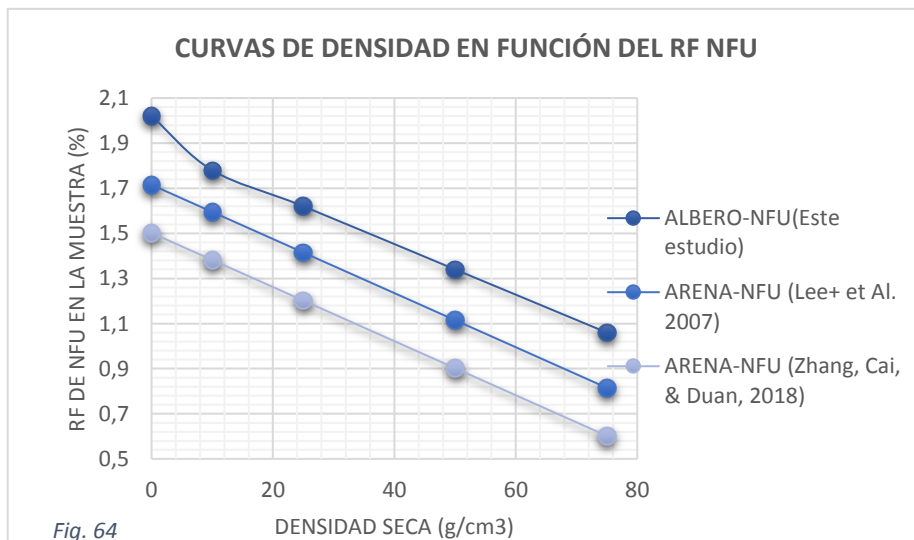
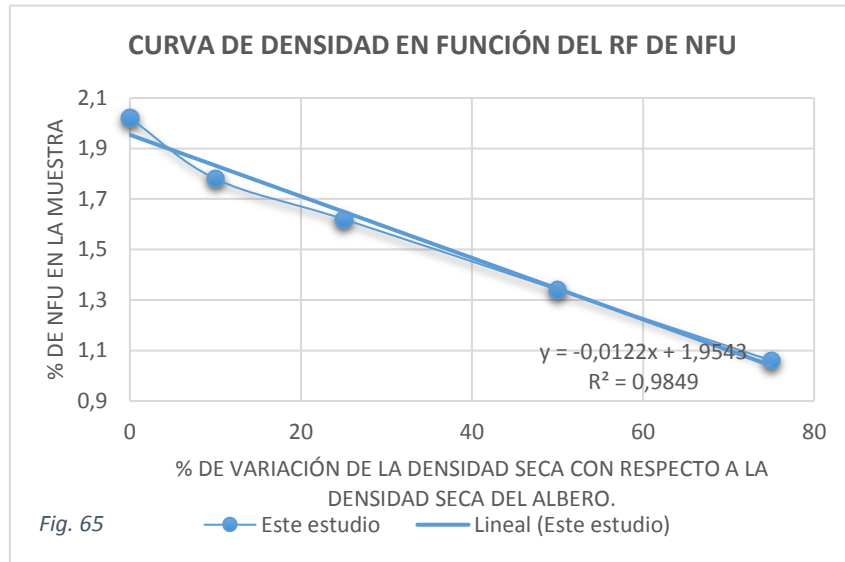
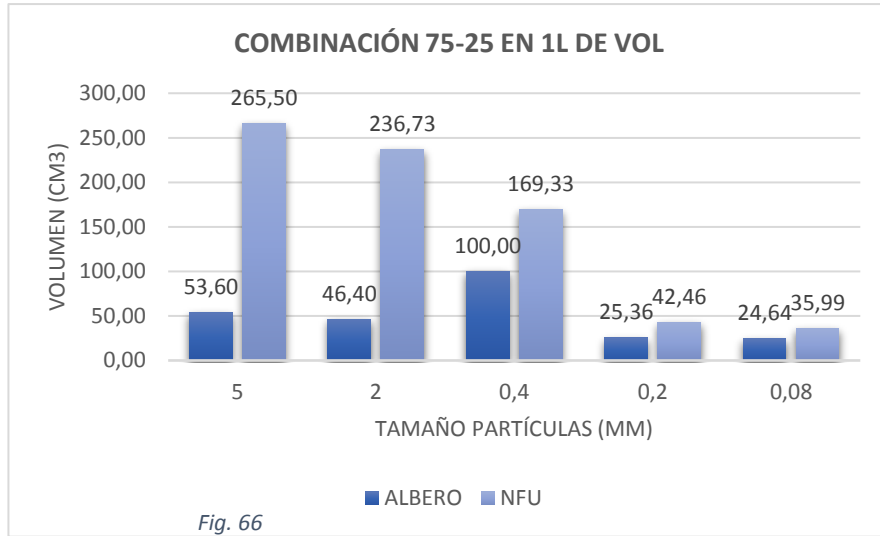


Fig. 61



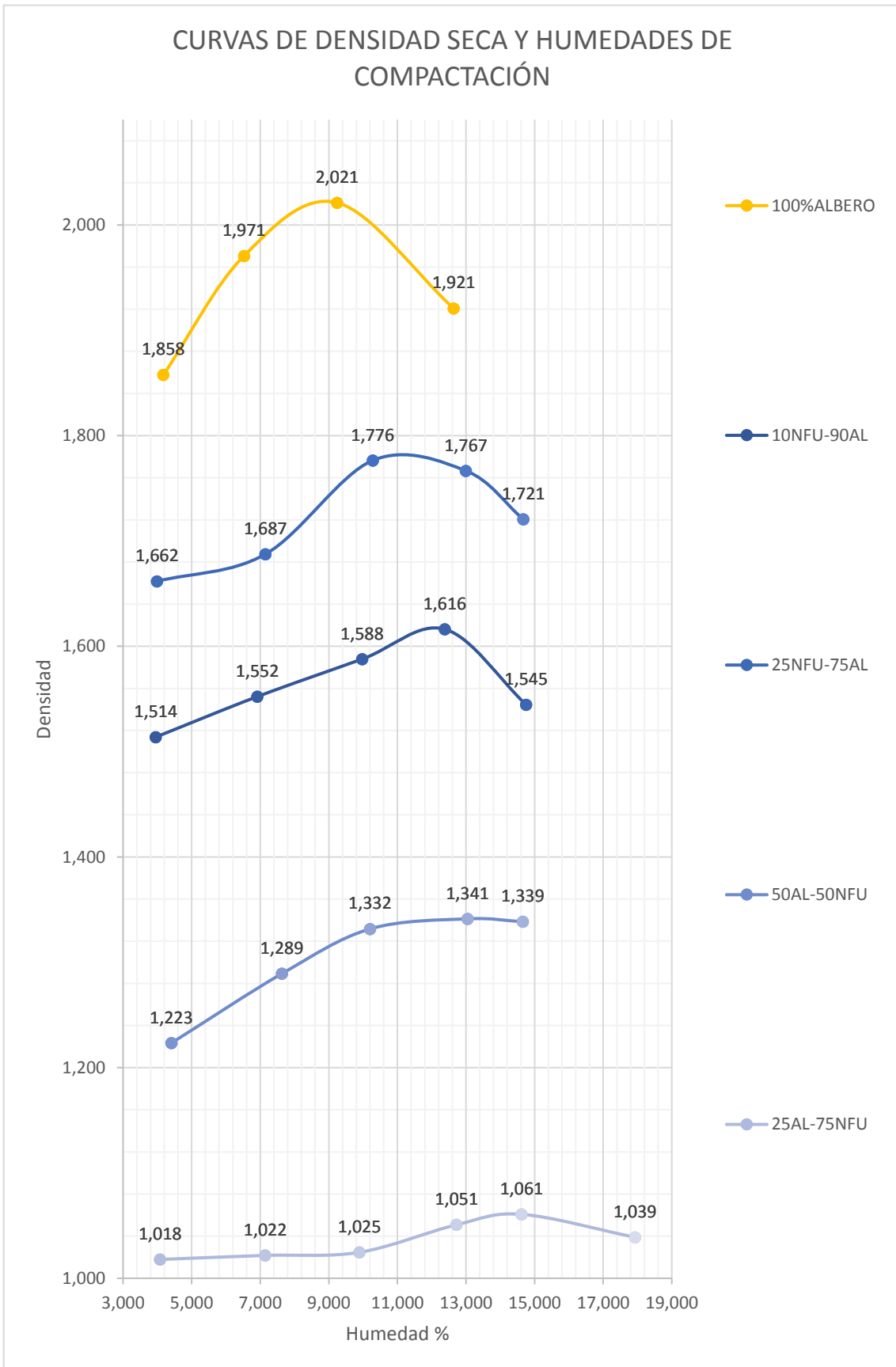


Fig. 67

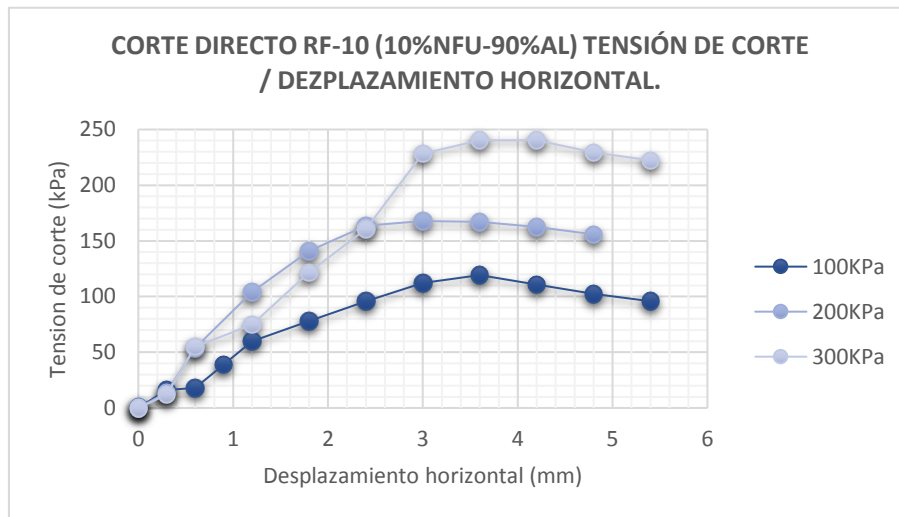
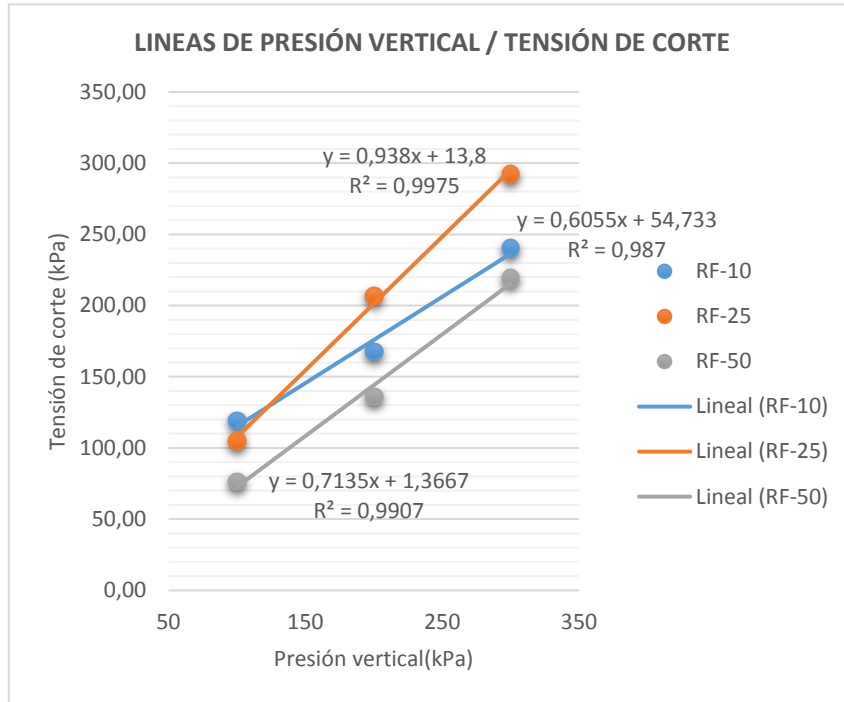


Fig. 60

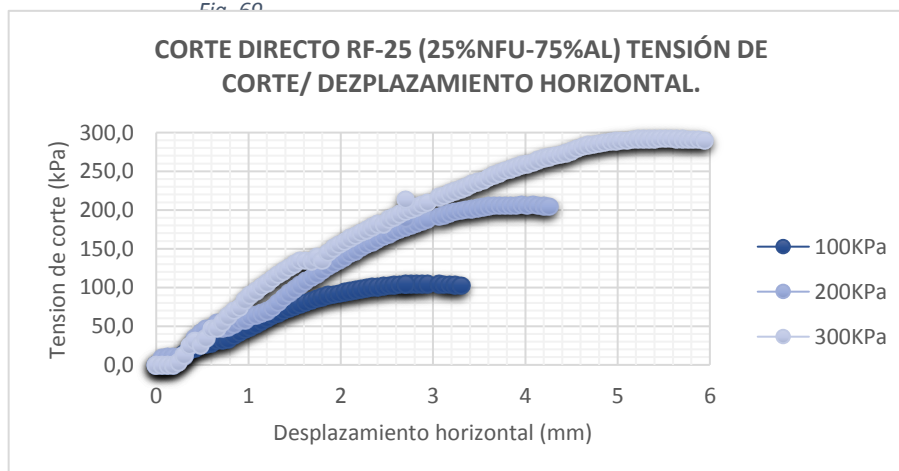


Fig. 68.

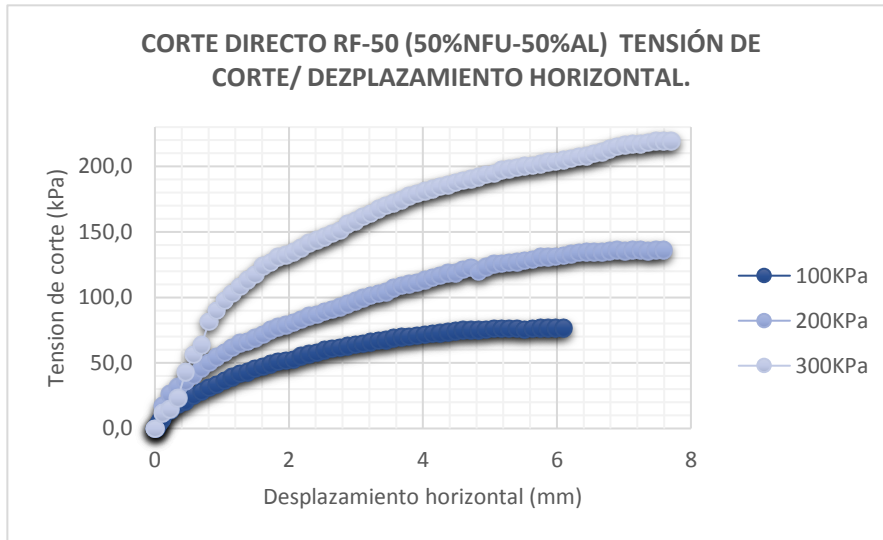


Fig. 71

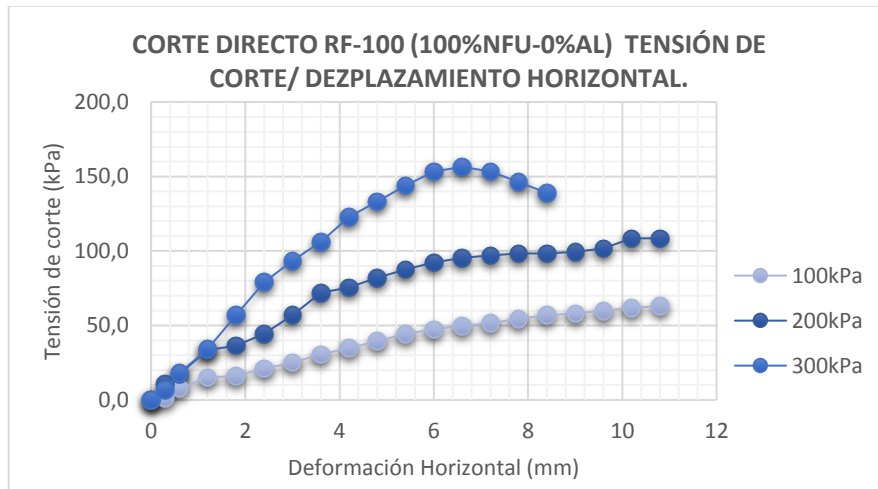


Fig. 72. Tesis Doctoral Elizabeth Contreras. Proyecto GRENECO.

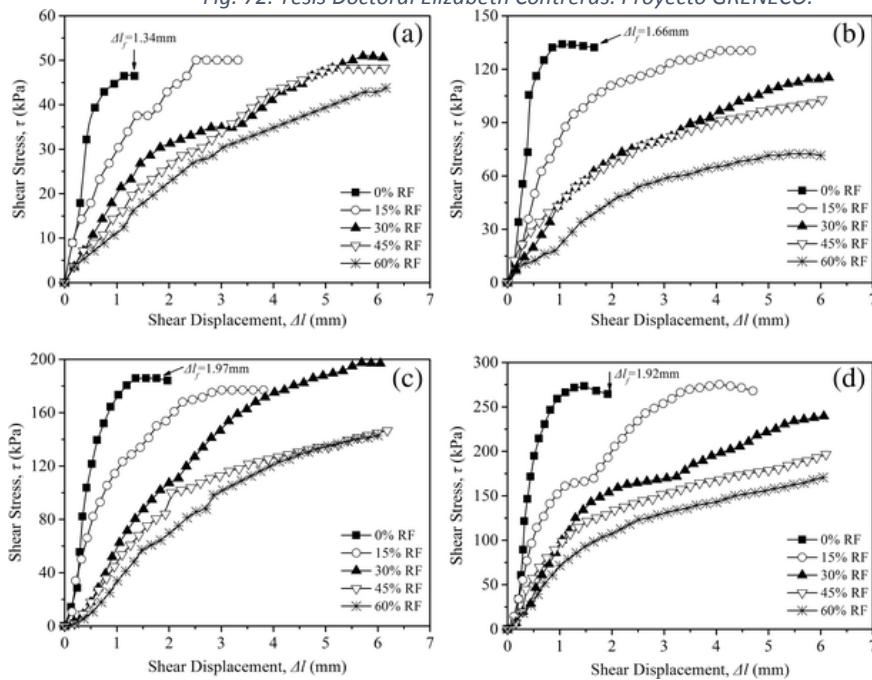


Fig. 70

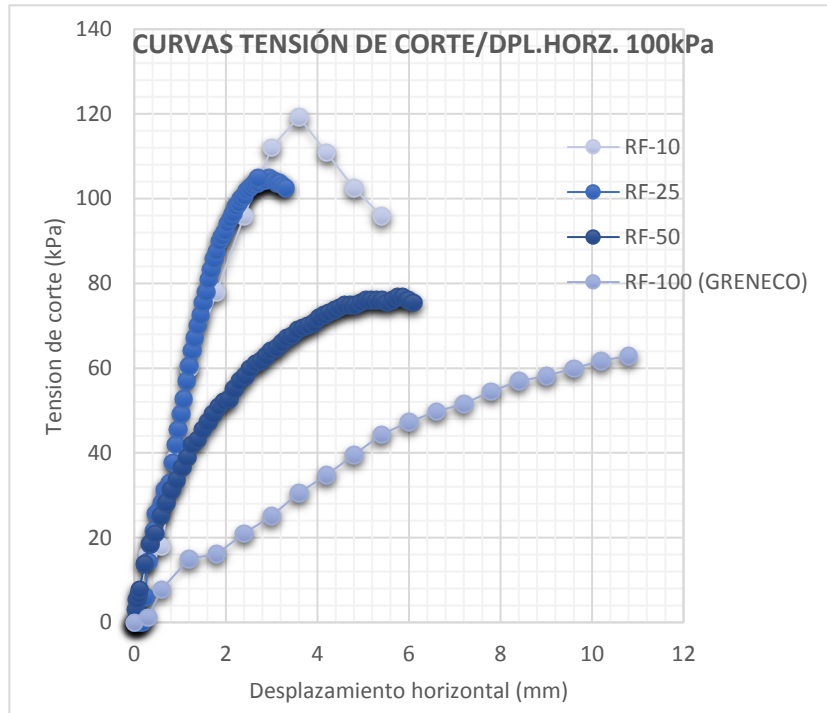


Fig. 74

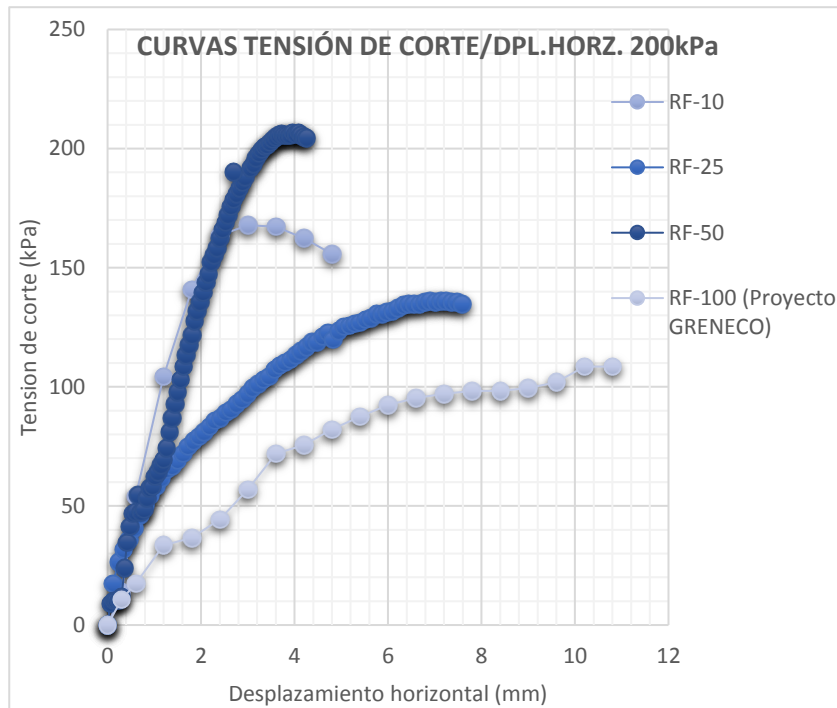


Fig. 73

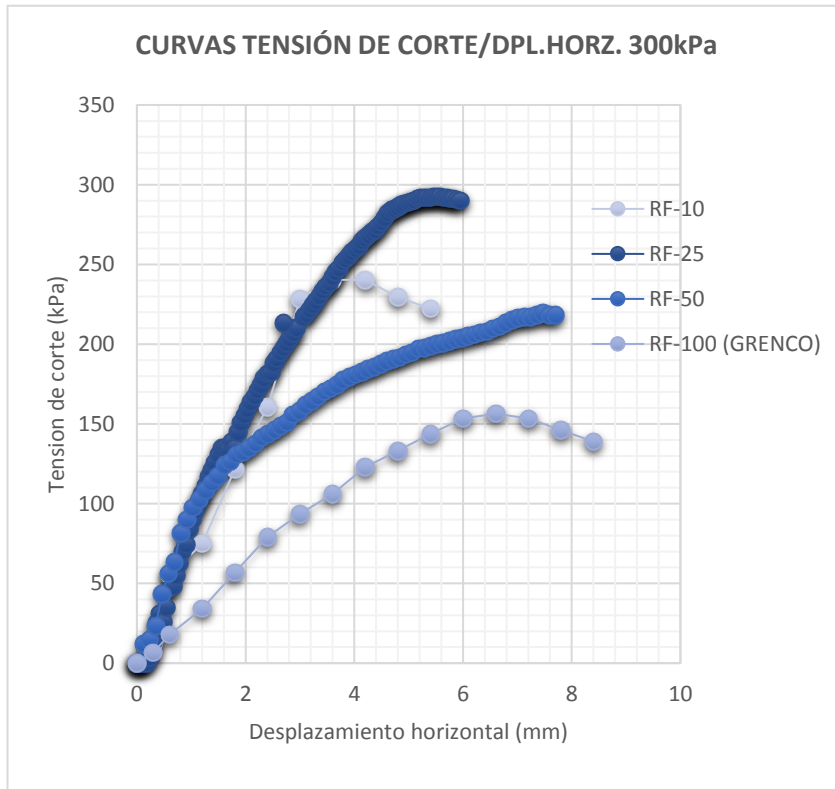


Fig. 75

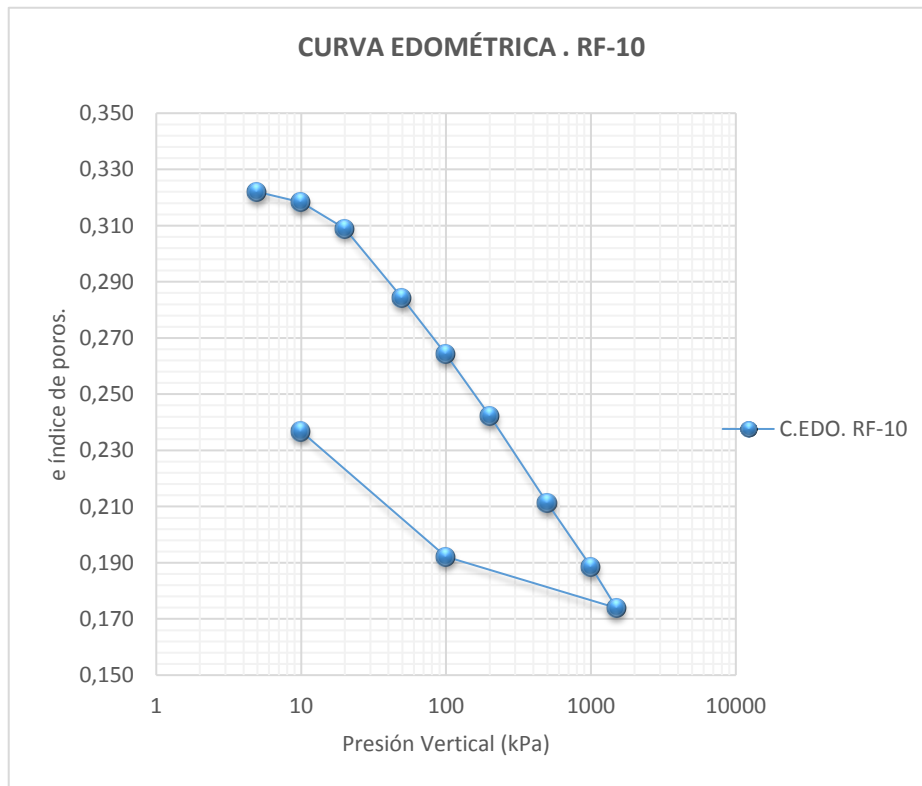


Fig. 76

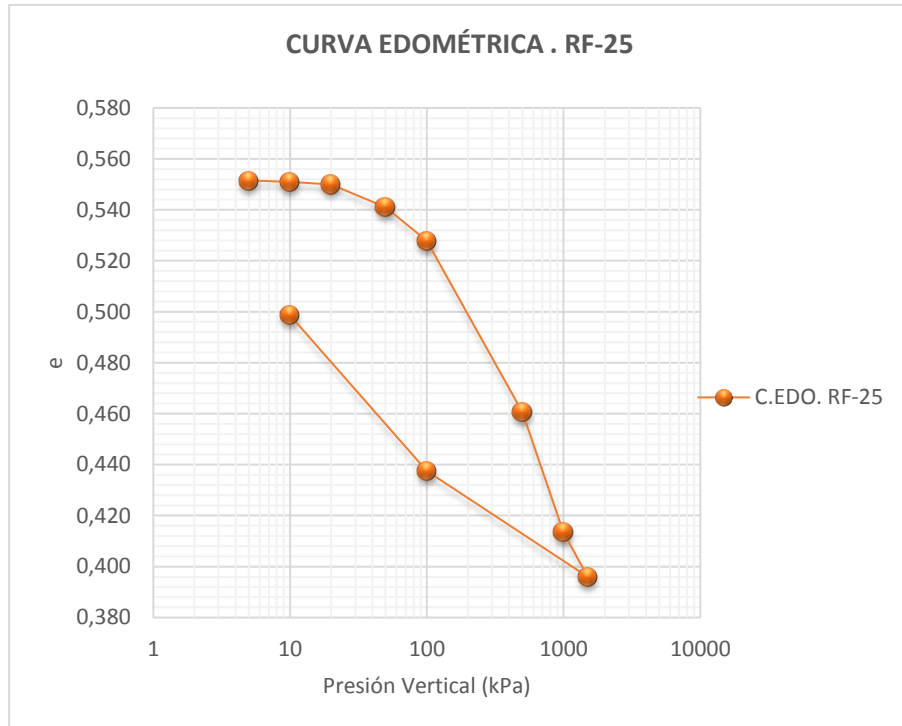


Fig. 78

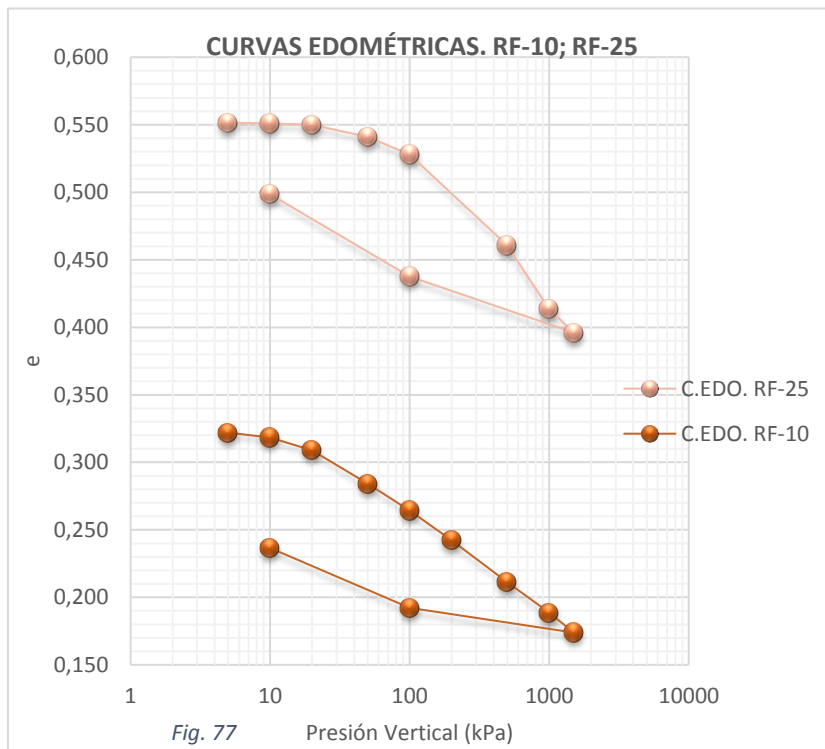


Fig. 77