



**CARACTERIZACIÓN FRENTE A SU
COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE
SUELOS MIXTOS DE ALBERO Y
GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE
USO (NFU)**

Trabajo Fin de Grado: Curso 2020-2021

Autor: Amparo Martínez Huelva

GRUPO: B-3

Tutor: Emilio Mascort

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla

RESUMEN:

La motivación principal de este trabajo de investigación surge de la necesidad de encontrar nuevos usos a uno de los residuos industriales que más caracterizan a la sociedad moderna tan dependiente del automóvil, como son los neumáticos fuera de uso (en adelante NFU), reciclando y revalorizando el granulado de NFU como árido para la construcción, reduciendo así la huella ecológica.

La nueva legislación europea sobre residuos, prohíbe el depósito de estos en vertedero, dando prioridad a la reutilización, reciclado y revalorización material y energética con el fin de hacer que poco a poco la economía circular se convierta en una realidad.

En este contexto, la presente investigación se centra en el diseño y caracterización hidráulicas de muestras mixtas de albero y granulado de NFU, evaluando los cambios de las muestras en función de las proporciones de NFU aportada a cada una de ellas, para poder ser utilizadas en un futuro como un nuevo árido para la construcción.

Para ello se llevó a cabo una campaña de ensayos en el Laboratorio de Mecánica del Suelo y Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Sevilla, basado fundamentalmente en ensayos de edometría con el objetivo de determinar las características de compresibilidad, resiliencia y deformaciones de las muestras, sometiéndolas a incrementos discretos de carga y descarga axial vertical.

Con el fin de conocer sus características de permeabilidad, se llevaron a cabo una serie de ensayos de permeabilidad bajo carga hidráulica constante y flujo ascendente. Usando para ello un permeámetro de pared rígida.

La caracterización se completa con la evaluación de las propiedades hidráulicas de las muestras diseñadas en base a su comparativa con suelos convencionales.

PALABRAS CLAVES:

Sostenibilidad, ensayo edométrico, ensayo de permeabilidad, reciclaje, residuo industrial, suelos mixtos, neumáticos fuera de uso.

AGRADECIMIENTOS:

Me gustaría expresar mi gratitud a las personas que han contribuido a la realización de este proyecto de investigación.

En primer lugar, mi sincero agradecimiento al Laboratorio de Mecánica del suelo y construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Sevilla, por su disposición a la hora de utilizar los equipos y maquinarias necesarias para el desarrollo de esta investigación y al personal por su paciencia. En especial a la Ingeniera Civil Elisabeth Conteras Marín por su incansable dedicación, ayuda y seguimiento en este trabajo de investigación y por último a mi tutor Emilio Mascort, por sus ánimos y ganas de trabajar.

ÍNDICE

Resumen y palabras claves

1. Introducción	4
1.1 Motivaciones generales.....	4
1.2 Grados de relevancia e innovación.....	4
1.3 Problemática existente con la gestión de los NFU.....	4
1.4 Reutilización y reciclaje de residuos industriales NFU ...	6
2. Objetivos	7
2.1.1 Objetivos generales.....	7
2.1.2 Objetivos específicos.....	7
2.2 Metodología.....	7
3. Caracterización hidráulica de las muestras de albero y granulado de NFU.	8
3.1 Diseño de muestras mixtas. Combinación del albero y granulado de NFU	8
3.1.1 Caracterización del albero.....	9
3.1.2 Caracteriza de granulado de NFU.....	9
3.1.3 Combinación de albero y granulado de NFU	10
3.1.3.1 Granulometría muestra RF-10.....	12
3.1.3.2 Granulometría muestra RF-25	12
3.1.3.3 Granulometría muestra RF-50.....	13
3.1.3.4 Granulometría muestra RF-75.....	14
3.2 Designación de los áridos mixtos de albero y granulado de NFU.....	14
3.3 Caracterización mediante ensayos de laboratorio.	
3.3.1 Ensayos de edometría	15
3.3.2 preparación del ensayo.....	15
3.3.3 Resultados	18
3.3.3.1 Muestra RF-10.....	21
3.3.3.2 Muestra RF-25.....	22
3.3.3.3 Muestra RF-50.....	23
3.3.3.4 Muestra RF-75.....	24
3.3.3.5 Gráficas comparativas de las curvas edométricas de las muestras mixtas de albero y NFU.....	25
3.3.4 Ensayo de permeabilidad	28
3.3.4.1 preparación del ensayo.....	28
3.3.4.2 Resultados	30
4. Reflexiones finales.	32
4.1 Interpretación de los resultados	32
4.2 Futuras líneas de investigación	33
5. Referencias	34
5.1 Bibliografía	34
5.2 Normativas	34.

1. INTRODUCCIÓN:

1.1 MOTIVACIONES GENERALES:

La motivación principal de este trabajo de investigación surge de la necesidad de encontrar nuevos usos a uno de los residuos industriales que más caracterizan a la sociedad moderna tan dependiente del automóvil, como son los neumáticos fuera de uso (en adelante NFU), reciclando y revalorizando el granulado de NFU como árido para la construcción.

Junto con esta motivación se nos presenta la oportunidad de desarrollar esta investigación con el apoyo del grupo de investigación TEP-108 Ingeniería del Terreno de la Universidad de Sevilla, destacando la implicación de la Ingeniera civil Elisabeth Contreras Marín quien participa actualmente en el desarrollo del Proyecto GRENECO, Granulado Reciclado de Neumáticos para la Construcción, en cuyos estudios e investigación está muy presente el granulado de NFU y ha dado apoyo durante todo el transcurso de esta investigación.

1.2 GRADOS DE RELEVANCIA E INNOVACIÓN:

Existen en la actualidad investigaciones que han desarrollado la caracterización del NFU sobre todo para granulometrías mayores de 12mm. Este proyecto de investigación se centra en la caracterización de las mezclas de albero y granulado de NFU menores a 12 mm, con el objetivo de poder incorporarlo como

árido a la construcción. Son estas, las partículas inferiores a 12mm, las que menos uso tienen en la actualidad, las que provocan el sobre almacenamiento de las plantas de tratado y causantes de los consiguientes problemas medioambientales.

1.3 ESTADO DE LA CUESTIÓN:

1.3.1 PROBLEMÁTICA EXISTENTE EN LA GESTION DE NFU.

Los neumáticos fuera de uso son uno de los residuos que más caracterizan a nuestra sociedad, aunque se trata de un residuo catalogado como no peligroso en la Lista Europea de Residuos con el código LER "16 01 03 Neumáticos al final de su vida útil". Sus particulares características, su durabilidad, junto con su alta capacidad calorífica que dificulta su extinción en caso de incendios trae consigo graves problemas medioambientales.

En 1999, la Unión Europea adoptó la directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos. Sus objetivos eran establecer medidas para reducir los efectos negativos del vertido de residuos, prohibiendo la eliminación por depósito en vertedero de neumáticos enteros desde 2003 y neumáticos troceados desde 2006.

Pero a pesar de su prohibición, el depósito en vertedero de NFU sigue siendo un problema en la actualidad.

Destacado fue el incendio que se desató en mayo de 2016 en el vertedero ilegal, ubicado en la localidad de Seseña, que estuvo activo veinticuatro días y arrasó 88.000 de las 100.000 toneladas que se encontraban acumuladas ilegalmente.



Figura.1: *Incendio en vertedero ilegal de Seseña. Fuente: Periódico digital El País (2016).*

La nueva legislación de la Unión Europea 2018/850/CE exige a los Estados miembros de la Unión Europea que adopten medidas específicas priorizando la prevención, reutilización, reciclado y la valoración energética por delante de la incineración y el depósito en vertedero que tan graves problemas medioambientales trae consigo.

En los últimos años se han generado en España más de 200.000 toneladas de neumáticos fuera de uso (NFU), de las cuales pertenecen a Andalucía entre 35.000 y 40.000 toneladas anuales.

Andalucía es una región que importa este residuo, por lo que las toneladas valoradas de NFU son mayores que las recogidas en la región. A continuación, se muestra una gráfica de la relación de los NFU puestos en el mercado, recogidos, reutilizados y valorados en nuestra región (Figura.2).

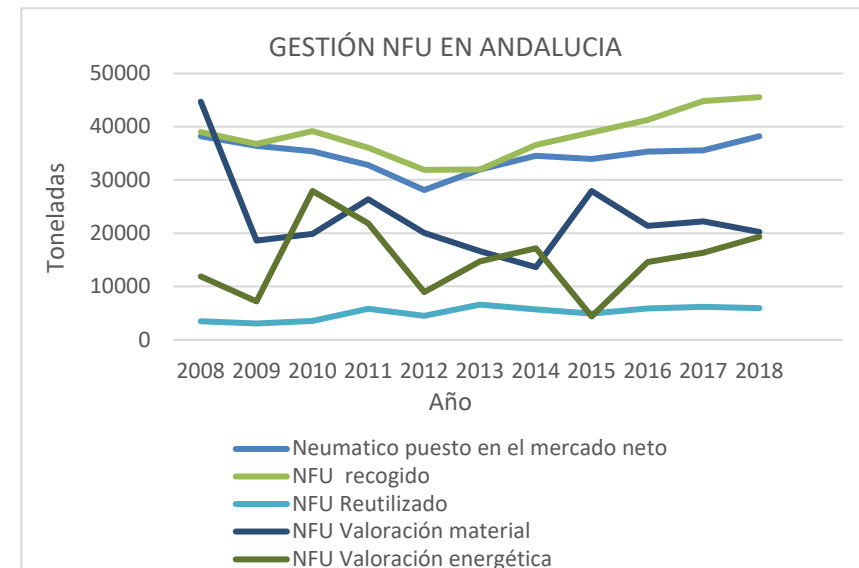


Figura.2: *Relación neumáticos puestos en el mercado, recogidos, reutilizados y valorados en Andalucía. Fuente: Memoria anual SIGNUS y TNU.*

Como se observa (Figura.2) el porcentaje de NFU reutilizado ha ido ascendiendo progresivamente hasta encontrarse actualmente en un 13% de los NFU recogidos y los porcentajes de NFU

valorados, material y energéticamente han ido cambiando a lo largo de una década, durante la cual, y en los últimos cinco años han ido igualándose sus porcentajes, siendo valoradas 20.000 toneladas anuales de las 45.567 recogidas en 2018 por la empresa gestoras SIGNUS Y TNT.

1.3.2 REUTILIZACIÓN Y RECICLAJE, USOS DEL RESIDUOS INDUSTRIALES NFU.

“Actualmente existen más de 500 productos en el mercado que usan NFU reciclados. La mayoría de ellos no se exportan o se comercializan en otros países, provocando que en un país exista una aplicación que se desconozca en los otros. Están creciendo las aplicaciones del troceado y de neumáticos enteros y las especialidades (p.e. elastómeros termoplásticos), mientras que en el caso del granulado hay una sobrecapacidad de producción” (Cano Serrano y Cerezo Garcia,2007:37).

Entre los usos más destacados se encuentran:

- Aplicaciones con neumáticos enteros: los neumáticos enteros están siendo usados en arrecifes artificiales, barreras acústicas, pistas provisionales para la circulación de vehículos en terrenos poco estables y macizos de suelos reforzados.
- Aplicaciones de los neumáticos triturados: el granulado de NFU, se comienza a usar en rellenos ligeros, pistas de

atletismo, como aislamiento térmico, aislamiento acústico, pistas multiuso, campos de hierba artificial, pavimentos de seguridad, capas drenantes en carreteras, calzados y equipamiento viales y ferroviarios.

- Aplicaciones como materiales bituminosos.
- Aplicaciones en construcción: Existen algunos estudios de adiciones de granulado de NFU en algunos cementos y hormigones ya que su elevado índice de elasticidad mejora la fragilidad del cemento.

2. OBJETIVOS

Podemos diferenciar entre objetivos generales y específicos:

2.1.1 OBJETIVOS GENERALES:

Se establecieron dos objetivos generales en el PFG:

OG-1: Caracterización de los suelos mixtos de NFU y albero frente a su comportamiento hidráulico.

OG-2: Evaluación de las propiedades hidráulicas de las muestras diseñadas en base a su comparativa con suelos convencionales como son arenas y arcillas.

2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

Para alcanzar el objetivo general 1 (OG-1) se han llevado a cabo los siguientes objetivos específicos:

OE-1.1: Elección de la combinación de las muestras mixtas de albero y granulado de NFU a estudiar.

OE-1.2: Evaluar el comportamiento y capacidad de compresibilidad y resiliencia de las muestras mediante el incremento de ciclos de cargas y descargas mediante ensayos de edometría.

OE-1.3: Evaluar el comportamiento y deformación unitaria mediante el incremento de ciclos de cargas y descargas mediante ensayos de edometría de las muestras de albero y NFU obtenidos en el laboratorio.

OE-1.4: Evaluación y análisis de la capacidad de permeabilidad de la combinación de las muestras de Albero y NFU, mediante ensayos de permeabilidad en el laboratorio.

Para alcanzar el objetivo general 2 (OG-2) se han llevado a cabo:

OE-2.1: A partir de los resultados obtenidos en los OB-1.2, OE-1.3 Y OE-1.4 se realizará una comparativa de los datos con suelos convencionales

2.2 METODOLOGÍA:

En base a cada uno de los objetivos descritos anteriormente, se pasa a definir la metodología empleada en esta fase de experimentación.

- Recopilación y análisis de la información disponible del granulado del NFU y el albero: Granulometría, densidad, disponibilidad del material.
- Diseño de muestras mixtas de albero y granulado de NFU, mediante procedimiento gráfico de tanteo, sustituyendo una fracción de Albero por NFU para un volumen de un litro.
- Caracterización hidráulica de las muestras mediante ensayos de edometría conforme a la normativa UNE-EN ISO 17892-5 y ensayos de permeabilidad en base a la normativa UNE-EN ISO 17892-11. La instrumentación para ejecutar cada uno de los objetivos específicos serán dispuestos por el Laboratorio de Mecánica del suelo y construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Sevilla.
- El volumen de ensayos estará constituido por una campaña de ensayos formado por 8 ensayos de edometría y 22 ensayos de permeabilidad.

3. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DE LAS MUESTRAS MIXTAS DE ALBERO Y GRANULADO DE NFU

Con el objetivo de conocer el comportamiento hidráulico de los suelos mixtos de albero y granulado de neumático fuera de uso, al que llamaremos NFU en adelante, se ha procedido a realizar el diseño de las muestras mixtas y a la realización posterior de una campaña de ensayos de edometría y permeabilidad.

La campaña de ensayos de edometría estuvo compuesta por dos ensayos para cada tipo de muestra, haciendo un total de ocho ensayos. Cada ensayo estuvo compuesto por ocho ciclos de carga y tres ciclos de descarga organizados en 76 días de trabajo de laboratorio, haciendo un total de 472hras (Tabla 1).

Tipos de suelos	N.º de ensayos	Ciclos de cargas	Ciclos de descarga	T. Ciclo de carga (horas)	T. Ciclo de descarga (Horas)	Tiempo de laboratorio (horas)
RF-10	2	8	3	7	2	124
RF-25	2	8	3	7	2	124
RF-50	2	8	3	7	2	124
RF-75	2	8	3	7	2	124
TOTAL	8	64	12	28	8	472 HORAS

Tabla 1: Programa de ensayos de edometría en el laboratorio.

Respecto a la campaña de ensayos de permeabilidad, se realizaron seis ensayos consecutivos de las muestras RF-25, RF-50, RF-75 y cuatro ensayos de la muestra RF-10, haciendo un total de 22 ensayos de permeabilidad durante cuatro jornadas de trabajo de laboratorio (Tabla 2).

Tipo de suelos	Nº de ensayos	T. de preparación de la muestra (horas)	Tiempo de cada ensayo	Tiempo de trabajo del laboratorio
RF-10	4	1	1.5 horas	9 hora
RF-25	6	1	15 minutos	1hora 30''
RF-50	6	1	9 minutos	1hora 54''
RF-75	6	1	8 minutos	1hora 48''
TOTAL	22	4		14hora 42''

Tabla 2: Programa de ensayos de permeabilidad en el laboratorio

3.1. DISEÑO DE MUESTRAS MIXTAS. COMBINACIÓN DEL ALBERO Y GRANULADO DE NFU.

El objetivo principal se basa en el diseño de muestras mixtas de un nuevo árido compuesto por un material ya conocido como es el albero junto con un material reciclado, el granulado de NFU, y la evaluación de los cambios de comportamiento de las muestras diseñadas en base a las proporciones de NFU aportadas.

“Los materiales granulados productos de la trituración de los neumáticos fuera de uso (NFU) presenta en general grandes ventajas en aplicaciones en obra de ingeniería civil, esto se debe a su bajo peso específico; elevada permeabilidad; mayor resistencia a la degradación en comparación de materiales convencionales” (Contreras, & Romero. 2020)

El primer trabajo que se ha realizado, corresponde con la localización y disponibilidad de los materiales tanto de albero como de NFU, su estudio granulométrico y una propuesta de combinación de ambos materiales.

3.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL ALBERO:

Se dispuso de una cantidad suficiente del albero, suministrada por el laboratorio, cuya densidad era ya conocida y aportada por el personal de laboratorio, 2,020g/cm³. Con el objetivo de poder realizar las combinaciones más adecuadas de las muestras, se realizó un estudio granulométrico del albero, de acuerdo con la normativa UNE-EN 933-1;2012 (Figura.3).



Figura.3: Proceso estudio granulométrico del Albero: Elaboración propia.

Tras escoger una muestra representativa de albero y pasarlo por los tamices (mm) 10, 5, 2, 0.4, 0.2 y 0.08, se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla3) y representación gráfica (Figura.4).

Tamices mm	% Pasante	% Retenido
10	91,4	9,9
5	84,0	17,3
2	73,9	10,1
0.4	37,9	35,5
0.2	12,1	25,5
0.08	1,4	1,7

Tabla 3: Resultados estudio granulométrico del Albero.

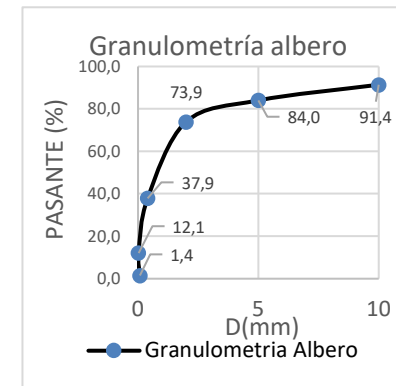


Figura.4.: Gráfica curva granulometría del albero

3.1.2 CARACTERIZACIÓN DEL NFU:

Se dispuso también de suficiente NFU que fue suministrado por las plantas de reciclado SIGNUS ECOVALOR y TNR. No fue necesario hacer un estudio granulométrico a diferencia del albero, ya que el NFU viene suministrado en diferentes granulometrías por las plantas de reciclado (Figura.5).



Figura.5: Granulometría NFU suministrada por las plantas de reciclado.

Finalmente se volvió a tamizar la granulometría suministrada por las empresas de reciclaje haciéndola pasar por los tamices (mm)

5, 2, 0.4, 0.2, 0.08 con el objetivo de obtener el granulado de NFU en la misma granulometría que el albero.

Para llevar a cabo la mezcla de las muestras es necesario conocer la densidad del granulado del NFU, y esta varía en función de su granulometría. Estos valores fueron suministrados por la estudiante de doctorado Contreras Marín, Elisabeth y obtenidos en el desarrollo del Proyecto GRENECO. Granulado reciclado de Neumáticos para la construcción, en el que participa, (Tabla 3).

Granulometría NFU	Densidad (g/cm ³)
<6mm	1,068
0,6-2 mm	1,074
2-7mm	0,944

Tabla 3: *Densidad aparente NFU*. Fuente: Proyecto GRENECO.

“El granulado de reciclado de NFU, tiene como propiedades físicas: superficie plana de forma irregular; la densidad de una pieza individual está comprendida entre 1,15 y 1,45 t/m³ para el material compactado, el granulado presenta permeabilidad elevada, asimilable a las correspondientes arenas finas, con eficiente de permeabilidad en el entorno de $5 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ ”. (Proyecto GRENECO, 2018).

3.1.3 DISEÑO DE MUESTRAS MIXTAS. COMBINACIÓN DE ALBERO Y GRANULADO DE NFU

Para diseñar las muestras mixtas de albero y NFU, se eligió un abanico de muestras que varían su contenido de caucho entre el

10% y el 75% con dos escalones intermedios de 50% y 25 % de NFU respecto al porcentaje de volumen de albero de la muestra.

Designaremos las muestras como RF-10, RF-25, RF-50 Y RF-75 (Tabla 4), donde RF expresa la fracción de volumen de granulado de NFU expresado el % respecto el volumen total de la muestra.

Designación Muestra	% NFU	% ALBERO
RF-10	10	90
RF-25	25	75
RF-50	50	50
RF-75	25	75

Tabla 4: *Designación de las muestras mixtas de albero y NFU*.

Se seleccionó la muestra RF-10, con el objetivo de evaluar los cambios de comportamiento del albero ante la incorporación de una pequeña fracción de granulado de NFU, la muestra RF-25, RF-50 y RF-75 se seleccionaron para ver la variación del comportamiento del albero ante la incorporación progresiva de un 25% de NF.

Para el ajuste granulométrico de las mezclas de albero y NFU se utilizó la curva de Fuller (EC.1), donde se representa la curva granulométrica de máxima compacidad en función del tamaño máximo del árido y su límite superior e inferior para un diámetro menor a 10mm.

$$y = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (EC.1)$$

Al superponer la gráfica granulométrica del albero (Figura 4) con la curva ideal y tolerancia de Fuller, se observa que para granulometrías superiores a 7mm, la gráfica se sitúa en un rango inferior al límite inferior de tolerancia (Figura 6).

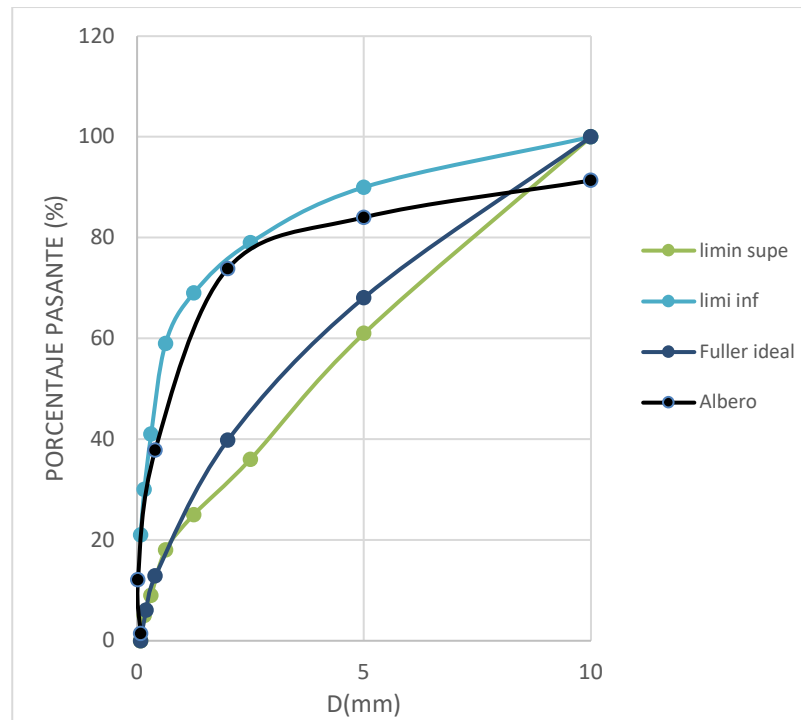


Figura.6: Gráfica granulométrica curva de Fuller y límite superior e inferior de tolerancia y granulometría albero.

Para ajustar la granulometría de las mezclas de albero y NFU lo máximo posible a curva ideal de Fuller, se tamizó el albero para separarlo en las diferentes granulometrías al igual que el NFU pasándolo por los tamices (mm): 5, 2, 0,4, 0,2, 0,08 (Figura 5).

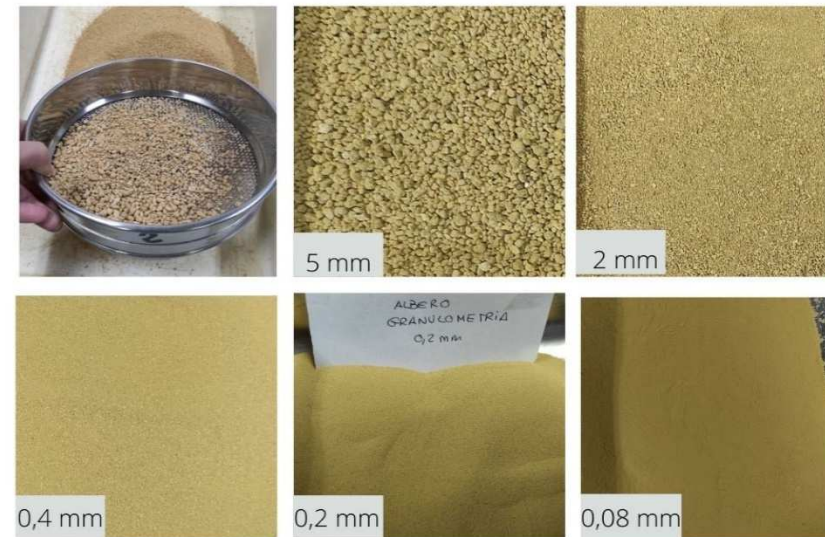


Figura.5: Granulometría albero. Elaboración propia.

A continuación, se procedió a un sistema de tanteo mediante procedimiento gráfico. Sustituyendo un porcentaje de volumen de albero por un porcentaje de volumen de NFU, teniendo en cuenta la diferencia de densidades entre el albero y el NFU para no alterar la curva de Fuller calculada previamente (Figura 6) y considerando los requisitos generales de los tamaños máximo y mínimo de un árido según EHE-08.

De este modo obtenemos las cuatro muestras mixtas: RF-10; RF-25; RF-50; RF-75 (Figura 8):



Figura.8: Muestras de suelos mixtos de albero y NFU. Elaboración propia

3.1.3.1 GRANULOMETRÍA MUESTRA RF-10

En la muestra de suelo mixto RF-10, el 10% del volumen de un litro de albero es sustituido por NFU mediante un proceso de tanteo gráfico en la curva de Fuller. Para ello se incorporaron los cm³ de albero y NFU en las distintas granulometrías hasta conseguir unas proporciones cuya granulometría final fuese lo más parecida a la curva ideal de máxima compactación de Fuller (Figura.9a), obteniendo la siguiente granulometría para las muestras RF-10 (tabla 4), cuyas proporciones en tantos por ciento en volumen de ambos materiales queda expresado en la Figura.9b.

RF-10 (V_{total} 1L)		
Granulometría (mm)	Vol. NFU (cm ³)	Vol. Albero (cm ³)
5-2	30,2	288,8
2-0,4	19,7	263,4
0,4-0,2	50	219,3
0,2-0,08	0	67,8
≤0,08	0	60,6

Tabla 4: cm³ de albero y NFU en un volumen de 1L. Muestra RF-10.

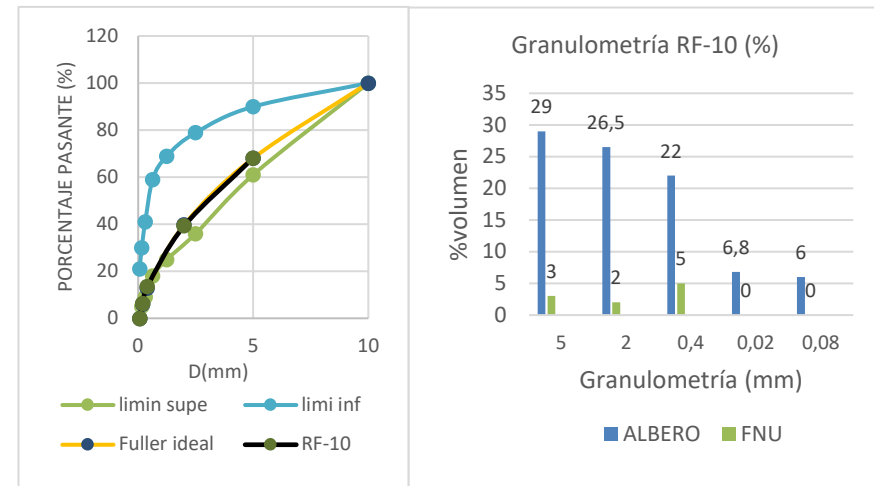


Figura.9a: RF-10, curva de Fuller

Figura.9b: Granulometría RF-10 (%)

3.1.3.2 GRANULOMETRÍA MUESTRA RF-25

La muestra RF-25 seguirá el mismo proceso que la muestra anterior, pero en este caso será un 25% del volumen de albero el que será sustituido por NFU obteniendo la siguiente granulometría para las muestras RF-25 (tabla 5), cuyas proporciones en tantos por ciento en volumen de ambos materiales queda expresado en la (Figura.10b).

RF-25 (V_{total} 1L)		
Granulometría (mm)	Vol. NFU (cm ³)	Vol. Albero (cm ³)
5-2	53,6	265,5
2-0,4	46,4	236,7
0,4-0,2	100	169,3
0,2-0,08	42,5	42,4
≤0,08	24,6	35,9

Tabla 5: cm³ de albero y NFU en un volumen de 1L. Muestra RF-25.

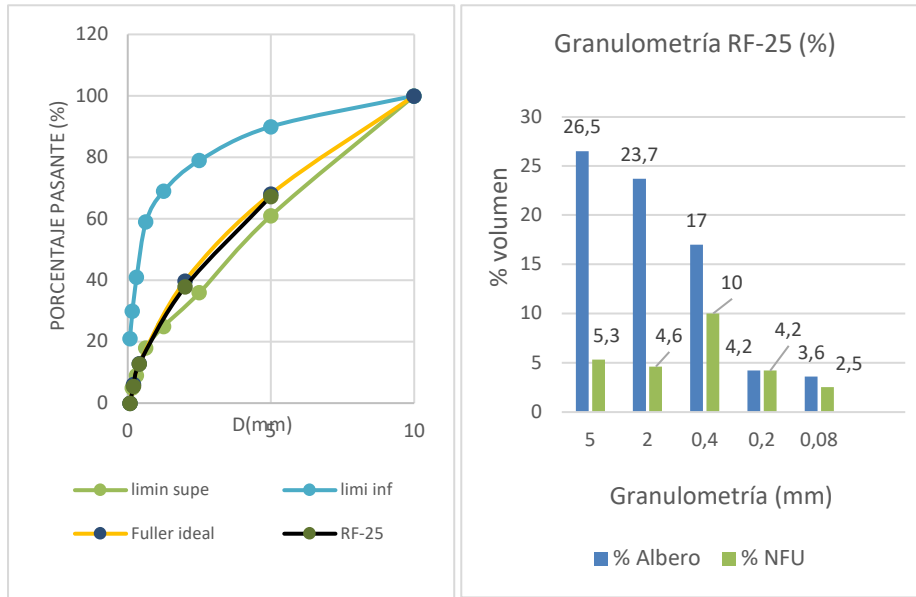


Figura.10a: RF-25, curva de Fuller (%)

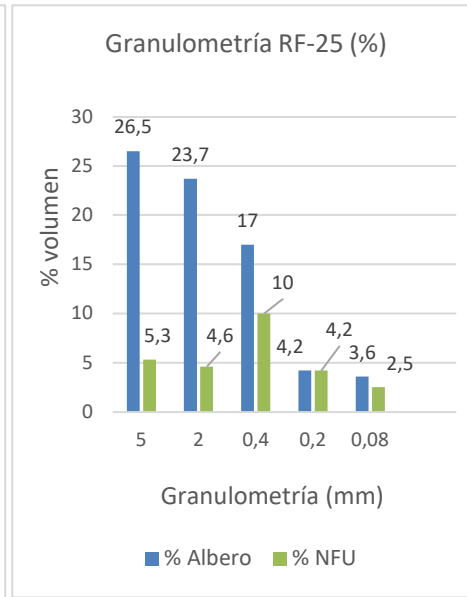


Figura.10b: Granulometría RF-25

3.1.3.3 GRANULOMETRÍA MUESTRA RF-50

La muestra RF-50 seguirá el mismo proceso que la nuestra anterior, pero en este caso será un 50% del volumen de albero el que será sustituido por NFU, obteniendo la siguiente granulometría para las muestras RF-50 (tabla 6) conservando la curva de Fuller (Figura.11a), cuyas proporciones en tantos por ciento en volumen de ambos materiales queda expresado en la Figura.11b.

RF-50 ($V_{total} 1L$)		
Granulometría (mm)	Vol. NFU (cm ³)	Vol. Albero (cm ³)
5-2	159,0	159,0
2-0,4	141,6	141,6
0,4-0,2	134,7	134,7
0,2-0,08	33,9	33,9
≤0,08	30,3	30,3

Tabla 6. cm³ de albero y NFU en un volumen de 1L. Muestra RF-50.

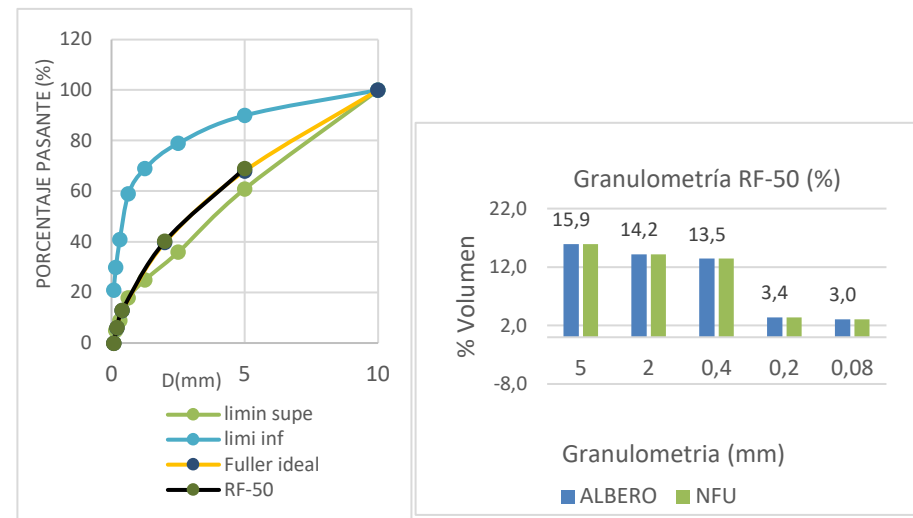


Figura.11a: RF-50, curva de Fuller

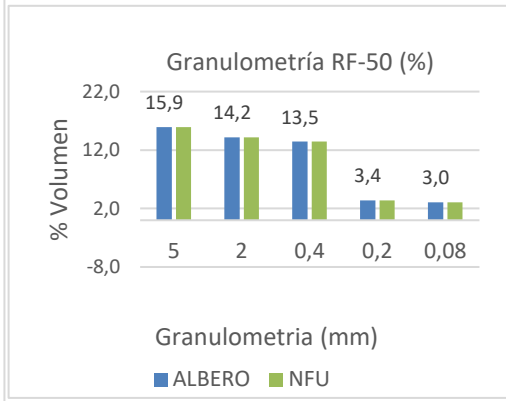


Figura.11b: Granulometría RF-50(%)

3.1.3.4 GRANULOMETRÍA MUESTRA RF-75

En la muestra RF-75, un 75% del volumen de albero es sustituido por NFU. Mediante tanteo gráfico se obtuvo la granulometría de la mezcla (Tabla 7), con una curva granulométrica cercana a la curva de Fuller y por dejado de su límite superior de tolerancia (Figura.12b), siendo su proporción en % albero-NFU la proporción representada en la Figura.12a

RF-75		
Tamices (mm)	VOL. NFU (cm3)	VOL. ALBERO (cm3)
5	265,5	53,6
2	236,7	46,4
0,4	169,3	100,0
0,2	42,5	25,4
0,08	36,0	24,6

Tabla 7. Resultados granulométricos muestra RF-75

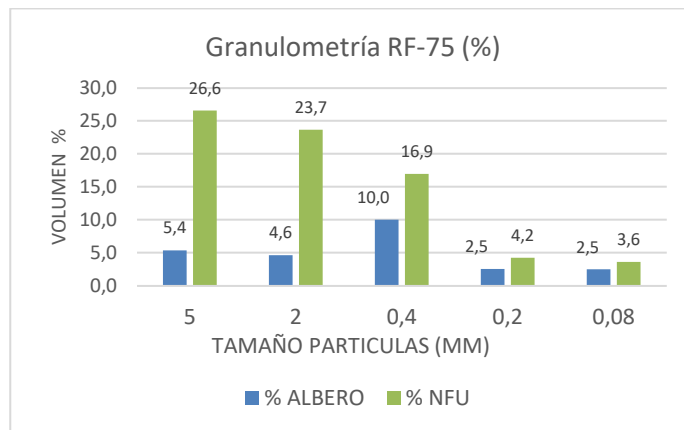


Figura.12 a: Granulometría RF-75(%)

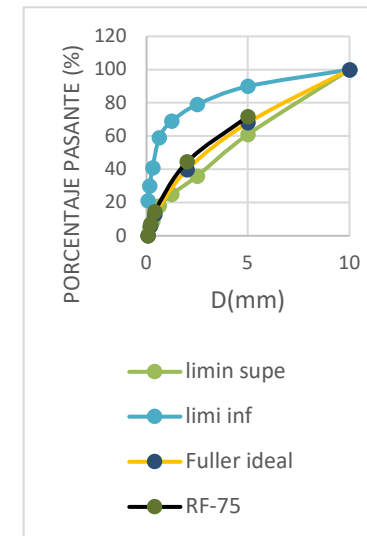


Figura.12 b: RF-75, curva de Fuller

3.2 DESIGNACIÓN DE LOS ÁRIDOS MIXTOS DE ALBERO Y GRANULADO DE NFU

En la actualidad no existe una normativa para los áridos industriales reciclados, por ese motivo se trataron las muestras mixtas de albero y NFU como un árido convencional y se ha usado la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, para realizar la designación de los áridos.

Designación: 0.08/5- M- CR

d: diámetro mínimo del árido: 0,08mm

D: diámetro máximo del árido: 5 mm

M: mixto

CR: Origen calizo y reciclado

3.3 CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DE LAS MUESTRAS MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO

3.3.1 ENSAYO DE EDOMETRÍA

Con el objetivo de determinar las características de compresibilidad, resiliencia y asentos de las cuatro muestras mixtas de NFU y albero se realizó una campaña de ensayos de edometría.

“Aunque las condiciones de carga de una cimentación cualquiera no inducen en general un estado de deformación lateral nula (unidimensional), resulta habitual emplear este modelo, con algunas modificaciones, para estimar los asentos producidos por terraplenes, zapatas, losas, etc., especialmente sobre suelos finos (limos y arcillas) saturados”. (González de Vallejo, 2002).

Para la campaña de ensayos se contaron con dos edómetros, (EDO1) y (EDO 2), realizándose dos ensayos de modo simultáneo. La campaña estuvo compuesta por dos ensayos por cada tipo de muestra, haciendo un total de ocho ensayos. Cada ensayo estuvo compuesto por ocho ciclos de carga y tres ciclos de descarga, organizados en setenta y seis días de trabajo de laboratorio.

Los ensayos de edometría de las muestras mixtas de NFU y albero se realizaron en una probeta cilíndrica confinada lateralmente con un anillo rígido llamado edómetro, el cual se somete a incrementos discretos de carga y descarga axial vertical y permite su drenaje axial a través de sus caras superior e inferior, midiendo los asentos y deformaciones que se producen.

3.3.1.1 PREPARACIÓN DEL ENSAYO DE EDOMETRÍA

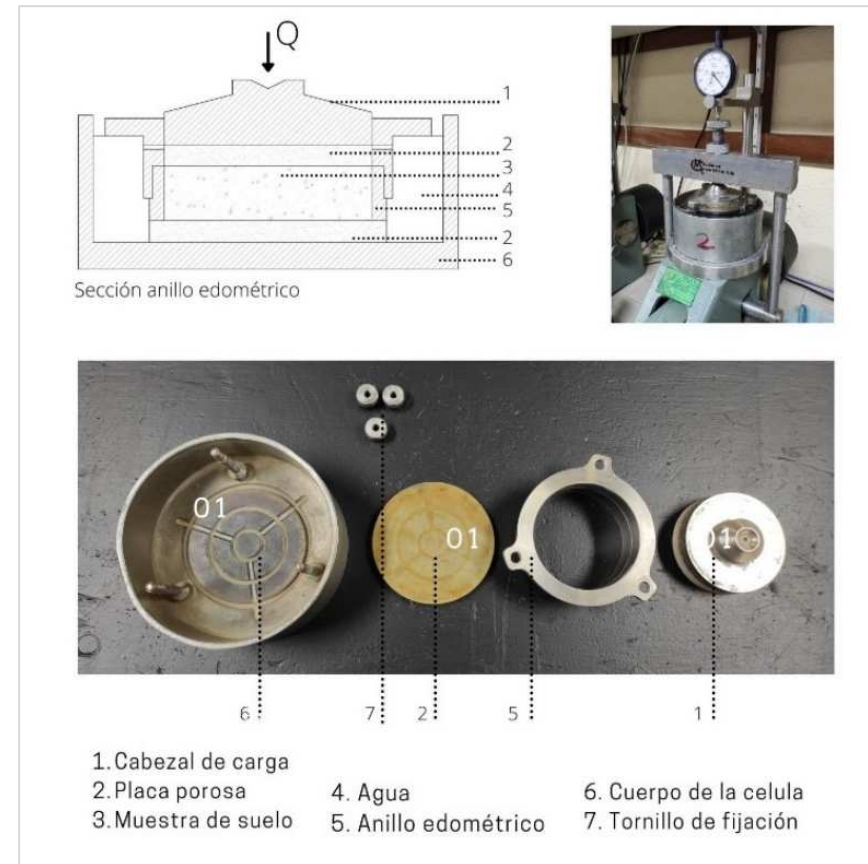
La realización del ensayo de edometría en el laboratorio se realizó de acuerdo con la normativa UNE-EN ISO 17892-5:2019 se necesitará un equipo edométrico formado por los siguientes elementos esenciales (Figura 13):

- Célula de edometría: Dicha célula debe estar compuesta por los siguientes elementos básicos (Figura 14):
 - Anillo edométrico: en nuestro caso de acero inoxidable de dimensiones, diámetro (D) 70mm y altura (H) 3,5mm, cuya relación no es menor a 2,5mm.
 - Placas porosas: las placas se disponen en la cara inferior y superior de la probeta. Su función es la de permitir el drenaje libre del agua y evitar la introducción de partículas.
 - Cuerpo de la célula: en nuestro caso una célula de anillo fijo, donde se sitúa la muestra del suelo a ensayar.
 - Cabezal de carga: Se sitúa sobre la placa porosa superior, colocándose de modo que permita el libre drenaje del agua. Debe ser rígido y que no sufra deformaciones apreciables durante el proceso de carga.
- Dispositivo de medición de la deformación.
- Batidor de carga: Elemento que permite la aplicación de presiones verticales en el pistón de carga, en nuestro caso mediante la colocación de pesos.



1. Dispositivo de medición de la deformación
2. Celula de edometría
3. Bastidor de carga
4. Bancada de cargas

Figura.13: Componentes que forman el equipo de edometría. Elaboración propia.



1. Cabezal de carga
2. Placa porosa
3. Muestra de suelo
4. Agua
5. Anillo edométrico
6. Cuerpo de la celula
7. Tornillo de fijación

Figura.14: Componentes de la célula de edometría. Elaboración propia.

El procedimiento operatorio de este ensayo es el siguiente: una vez montada la célula de edometría, la muestra del suelo mixto fue situada en su interior, incorporando el agua suficiente para alcanzar la humedad óptima. La humedad aportada a cada muestra, será la máxima humedad de compactación, obtenido del trabajo académico de Aguilera, M (Tabla 8).

“En los ensayos (...) 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 también aumenta” (Aguilera, M. 2019, Trabajo académico)

Muestras	Max. Densidad gr/cm3	Max. Humedad de compactación %
RF-10	1,776	11
RF-25	1,616	12,5
RF-50	1,341	13
RF-75	1,061	14,5

Tabla 8. Resultados Proctor Norma: Máxima humedad de compactación. Aguilera, M. Trabajo académico 2019

Una vez incorporada el agua a la muestra, esta se introduce dentro del cuerpo de la célula en tres tongadas. Cada tongada se compacta con diez golpes haciendo un círculo en el sentido de las agujas del reloj y comenzando y terminado en el centro de probeta. Una vez remodelada la probeta se procede al montaje de la célula, se pesa y registra la masa de la muestra (Figura 15).

Se llena la célula de agua de manera que quede cubierta la placa porosa superior y se coloca sobre la bancada, ajustando el contrapeso y todos los elementos de transmisión de carga. Se coloca el medidor de deformaciones en su posición y se toma nota de la primera lectura que corresponde a cero de deformaciones (Figura 15), y se procede al inicio del ensayo.

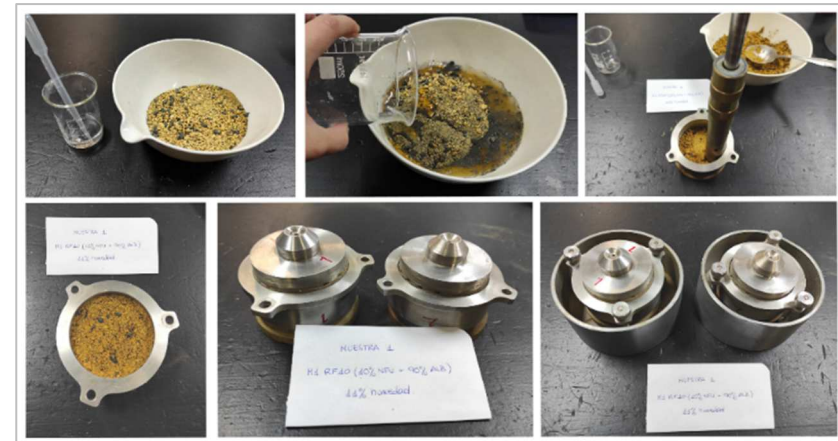


Figura.15: Preparación de la muestra, ensayo de edometría. Elaboración propia.

Cada ensayo está formado por ocho escalones de carga mediante la aplicación de las siguientes secuencias de presiones: 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000 KPa.

Con el objetivo de obtener la curva de consolidación que relaciona las deformaciones producidas con el tiempo, en cada escalón de carga se realizan las siguientes lecturas en los siguientes intervalos de tiempo: 10, 20, 30, 40, 50 segundos; 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 15, 20, 30, 45 minutos; 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 24 horas.

Finalizado las secuencias de carga y descarga, se retira la célula del edómetro eliminando el agua, se procede a pesar el conjunto de anillo edométrico más probeta y se introduce la probeta en la estufa a 110°C durante 24h, pesándola y obteniendo su masa (Figura 16).



Figura.16: Desmontaje de la célula edométrica, secado y medición de la probeta en estufa. Elaboración propia.

3.3.1.2 CÁLCULOS Y RESULTADOS:

Para realizar los ensayos contamos con dos equipos de edometría al que llamare EDO 1 y EDO 2 y cuyos ensayos se realizarán simultáneamente. Con ellos se realizaron un programa de 8 ensayos de edometría formado por una serie de 2 ensayos respectivamente de cada una de las muestras RF-10, RF-25, RF-50 y RF-75 obteniéndose la humedad inicial, densidad inicial aparente, densidades secas y sus características de compresibilidad, índice de poros y deformación unitaria de las muestras.

Humedad inicial: La humedad inicial (W_0) expresada en % se determina a partir de la masa húmeda inicial y la masa seca final de la probeta. La masa final de la probeta se obtiene pesando directamente la muestra secada en la estufa a 110°C tras 24h. Viene expresada por la ecuación (Ec.2).

$$W_0 = \frac{m_0 \times m_f}{m_0} \quad (Ec. 2)$$

Obteniendo los siguientes resultados (Tabla 9):

Nuestras	Wo Media %	Ensayos muestras	Masa inicial (gr)	Masa Final (gr)	Wo %
RF-10	14,6%	M 1 (EDO 1)	110,37	94,44	14,4%
		M2 (EDO 2)	82,11	69,93	14,8%
RF-25	15,5%	M 1 (EDO 1)	169,19	142,75	15,6%
		M2 (EDO 2)	135,03	114,4	15,3%
RF-50	21,7%	M 1 (EDO 1)	140,58	110,21	21,6%
		M2 (EDO 2)	134,62	105,21	21,8%
RF-75	25,8%	M 1 (EDO 1)	128,74	95,6	25,7%
		M2 (EDO 2)	127,82	94,74	25,9%

Tabla 9: Humedad inicial de las muestras obtenidos en ensayos de Edometría.

Tras los resultados obtenidos se puede observar que a medida que aumenta la proporción de NFU en las muestras, la humedad inicial de las muestras también aumenta progresivamente.

Haciendo una comparativa con las características de suelos convencionales, podemos afirmar que respecto al porcentaje de humedad inicial, las muestras mixtas de NFU y albero se comportan como una arena (Figura 17), con una humedad de rango 14,4% al 26%.

Descripción	Porosidad n (%)	Relación de vacíos e	Contenido de humedad S _r = 1 w (%)	Densidad (Mg/m ³)	
				ρ _d	ρ _s
Arena uniforme suelta	46	0.85	32	1.44	1.89
Arena uniforme densa	34	0.51	19	1.75	2.08
Arena bien gradada suelta	40	0.67	25	1.59	1.98
Arena bien gradada densa	30	0.43	16	1.86	2.16
Grava glacial bien gradada	20	0.25	9	2.11	2.32
Arcilla glacial blanda	55	1.20	45	1.21	1.76
Arcilla glacial dura	37	0.60	22	1.69	2.06
Arcilla ligeramente orgánica blanda	66	1.90	70	0.92	1.57
Arcilla muy orgánica blanda	75	3.00	110	0.68	1.43
Arcilla montmorionítica blanda (bentonita)	84	5.20	194	0.44	1.28
Turba amorfa	91	10	500	0.18	1.09
Turba fibrosa	94	15	1,000	0.09	1.03

Figura 17: Propiedades de los suelos granulares. Fuente: Mecánica de suelos, Berry 1993

Densidad inicial aparente y densidad seca de las muestras:

Para determinar la densidad inicial aparente y la densidad seca de las muestras de NFU y albero se empleó la Norma ISO 17892-2.

La densidad inicial aparente se define como el cociente entre la masa de un determinado volumen de suelo en relación al volumen que ocupa y viene expresado por la ecuación (Ec.3).

$$\rho_s = \frac{m}{V} \left(\frac{kn}{m_3} \right) \quad (Ec. 3)$$

m: masa seca de la probeta, finalizado el ensayo y secado 24 horas en el horno a 110°C.

V: Volumen del interior del anillo edométrico que será constante para todos los ensayos ya que los edómetros tienen el mismo volumen.

$$V = \pi \frac{D^2}{4} \times H = 134,69 \text{ cm}_3$$

Densidad seca de la muestra: viene definida como ρ_d (gr/cm₃) y expresa la relación entre masa de las partículas sólidas y el volumen total del suelo. Viene expresado por la ecuación (EC.4):

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + \frac{w}{100}} \quad (EC. 4)$$

Donde: W es la humedad del suelo, expresada en porcentaje respecto a la masa seca.

Obteniendo los siguientes resultados en la serie de ensayos (Tabla 10):

Muestras	Ensayos muestras	ρ (gr/ cm3)	ρ _d (gr/ cm3)
RF-10	M 1 (EDO 1)	0,701	0,613
	M2 (EDO 2)	0,519	0,452
RF-25	M 1 (EDO 1)	1,060	0,917
	M2 (EDO 2)	0,849	0,737
RF-50	M 1 (EDO 1)	0,818	0,673
	M2 (EDO 2)	0,781	0,641
RF-75	M 1 (EDO 1)	0,714	0,570
	M2 (EDO 2)	0,703	0,559

Tabla.10: Densidad inicial aparente y densidad seca de las muestras tras el ensayo de Edometría.

Respecto a la densidad seca obtenida de las muestras, tienen unos valores comprendidos entre 0,45 gr/cm³ y 0,9 gr/cm³.

Haciendo una comparativa con suelos convencionales, las muestras mixtas de albero y NFU tienen valores similares a las arcillas (Figura 15).

Características de compresibilidad de las muestras:

Las características de compresibilidad de la muestra, son aquellas que expresan cómo se deforma la muestra al aplicarle incrementos de carga y descarga axial, midiendo el índice de poros, asientos y deformaciones unitarias.

Las características de compresibilidad son representadas mediante una gráfica relacionando las presiones, representadas en abscisas en escala logarítmica respecto a los índices de poros representada en ordenadas y en escala lineal. Esta gráfica se denomina curva edométrica (Figura.18)

Mediante el ensayo de edometría se obtienen la relación del índice de poros de las muestras correspondiente al final de cada escalón de carga y descarga y su índice de poros inicial, que viene expresado por la ecuación (Ec.5) y (Ec.6).

$$e_f = \frac{H_f - H_s}{H_s} \quad (Ec. 5)$$

$$e_0 = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (Ec. 6)$$

Siendo (H_s) la altura del sólido de la mezcla, viene expresado por la ecuación (Ec.7).

$$H_s = \frac{H_0}{1 + e_0} \quad (Ec. 7)$$

Durante el ensayo también se calcula la altura de la probeta al final de cada escalón de carga y descarga, expresado por la ecuación (Ec.8):

$$H_f = H_0 - \Delta H \quad (Ec. 8)$$

Siendo ΔH , la reducción de altura de la muestra ensaya en el interior de la célula edométrica, la deformación medida desde el inicio del ensayo hasta el final del escalón que se considere, expresada en (mm).

La deformación unitaria vertical que sufre la muestra durante el ensayo también es cuantificable mediante la expresión (Ec.9), definida como la diferencia entre la altura de la probeta en cada escalón de carga y la altura inicial.

$$E_{v,f} = \frac{H_0 - H_f}{H_0} \quad (Ec. 9)$$

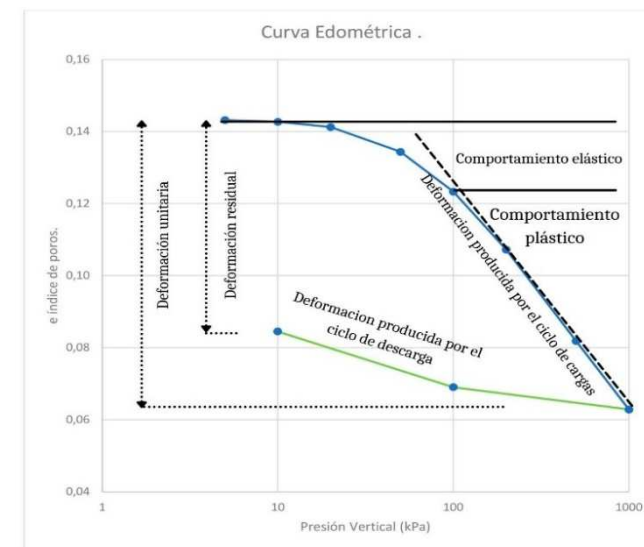


Figura.18: Esquema, curva edométrica. Elaboración propia

3.3.1.2.1 MUESTRAS RF-10

Se realizan simultáneamente los ensayos de dos muestras de RF-10. La muestra RF-10 M1 realizada con el equipo de edometría (EDO 1), y la muestras RF-10 M2 realizada con el equipo de edometría (EDO 2) que contienen un 10% de NFU y un 90% de albero en su granulometría.

Tras finalizar el ensayo de edometría y someterlo a incrementos de carga y descarga axial se obtuvieron los siguientes resultados respecto asientos, deformación unitaria e índice de poros final (Tabla 11 a y Tabla 11 b). Observándose que no hay diferencias significativas entre la muestra M1 (EDO1) y la muestra M2 (EDO2) durante los ensayos.

En sus gráficas de presión-deformación (Figura.19), y tabla de resultados (Tabla 11a y Tabla 11b) se puede observar un primer tramo de compresión con un comportamiento plástico hasta la presión de 100Kpa, con una deformación unitaria comprendida entre 1,77% y 2,85%. La curva continua con un comportamiento elástico hasta el final de su ciclo de carga (1000Kpa) con deformación unitaria del 7 al 8 %.

Cuando las muestras son completamente liberadas de presiones, sufre una deformación residual del 4%.

RF-10 M1

Presión (kPa)	L final (μ)	Asiento (μ)	Altura Hf (μ)	Altura poros (μ)	ef	Def. unit. (%)
0	9740	0	35000	4402	0,14	0,00
5	9729	11	34989	4391	0,14	0,03
10	9715	25	34975	4377	0,14	0,07
20	9669	71	34929	4331	0,14	0,20
50	9460	280	34720	4122	0,13	0,80
100	9121	619	34381	3783	0,12	1,77
200	8628	1112	33888	3290	0,10	3,18
500	7852	1888	33112	2514	0,08	5,39
1000	7270	2470	32530	1932	0,06	7,06
100	7459	2281	32719	2121	0,06	6,52
10	7932	1808	33192	2594	0,08	5,17
0	8321	1419	33581	2983	0,09	4,05

Tabla 11 a: Resultados RF-10 M1 en ensayo de Edometría

RF-10 M2

Presión (kPa)	L final (μ)	Asiento (μ)	Altura Hf (μ)	Altura poros (μ)	ef	Def. unit. (%)
0	9455	0	35000	4402	0,14	0,00
5	9449	6	34994	4396	0,14	0,02
10	9430	25	34975	4377	0,14	0,07
20	9369	86	34914	4316	0,14	0,25
50	8950	505	34495	3897	0,12	1,44
100	8459	996	34004	3406	0,11	2,85
200	8063	1392	33608	3010	0,09	3,98
500	7311	2144	32856	2258	0,07	6,13
1000	6608	2847	32153	1555	0,05	8,13
100	7321	2134	32866	2268	0,07	6,10
10	7437	2018	32982	2384	0,07	5,77
0	7925	1530	33470	2872	0,09	4,37

Tabla 11 b: Resultados RF-10 M2 en ensayo de Edometría.

Curva índice de poros frente a presión efectiva vertical:

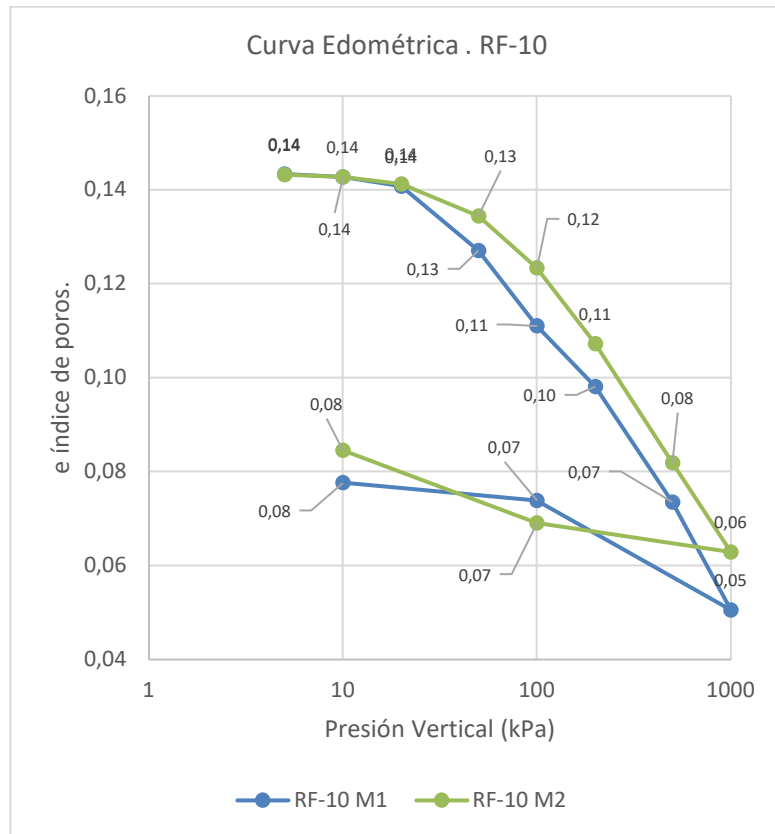


Figura.19: Gráfico índice de poros frente a presión efectiva, Muestra M1 RF-10

3.3.1.2.2 MUESTRAS RF-25

RF-25 M1

Presión (kPa)	L final (μ)	Asiento (μ)	Altura Hf (μ)	Altura poros (μ)	ef	Def. unit. (%)
0	9449	0	35000	4737	0,15	0,00
5	9408	41	34959	4696	0,15	0,12
10	9349	100	34900	4637	0,15	0,29
20	9170	279	34721	4458	0,14	0,80
50	8681	768	34232	3969	0,13	2,19
100	8221	1228	33772	3509	0,11	3,51
200	7621	1828	33172	2909	0,09	5,22
500	6665	2784	32216	1953	0,06	7,95
1000	5849	3600	31400	1137	0,03	10,29
100	6435	3014	31986	1723	0,05	8,61
10	7411	2038	32962	2699	0,08	5,82
0	8040	1409	33591	3328	0,11	4,03

Tabla 12 a: Resultados M1 RF-25 en ensayo de Edometría.

RF-25 M2

Presión (kPa)	L final (μ)	Asiento (μ)	Altura Hf (μ)	Altura poros (μ)	ef	Def. unit. (%)
0	9499	0	35000	4737	0,15	0,00
5	9383	116	34884	4621	0,15	0,33
10	9365	134	34866	4603	0,15	0,38
20	9329	170	34830	4567	0,15	0,49
50	9125	374	34626	4363	0,14	1,07
100	8792	707	34293	4030	0,13	2,02
200	8226	1273	33727	3464	0,11	3,64
500	7348	2151	32849	2586	0,08	6,15
1000	6649	2850	32150	1887	0,06	8,14
100	7161	2338	32662	2399	0,07	6,68
10	7958	1541	33459	3196	0,10	4,40
0	8295	1204	33796	3533	0,11	3,44

Tabla 12 b: Resultados M1 RF-25 en ensayo de Edometría.

Curva índice de poros frente a presión efectiva vertical RF-25

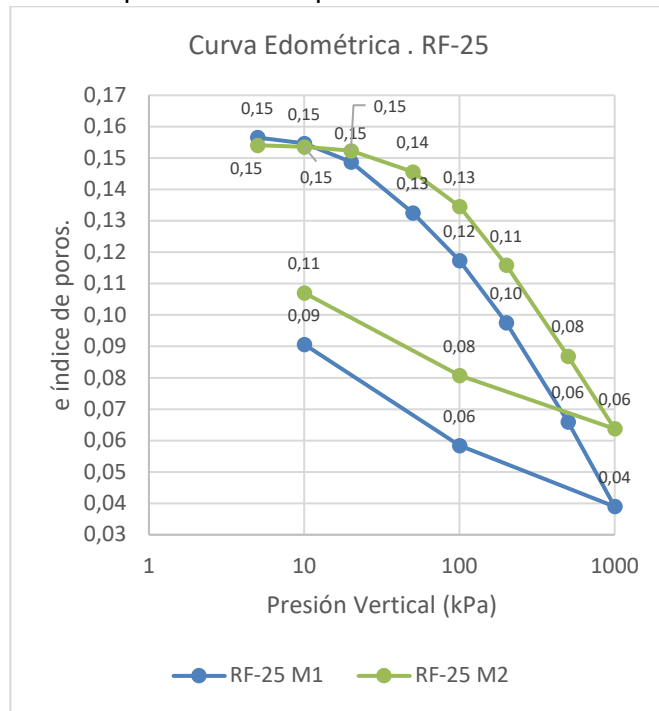


Figura 20: Gráfico Índice de poros frente a presión efectiva, Muestra M1RF-25.

Las muestras RF-25 M1 y RF-25 M2, no sufre variaciones muy drásticas respecto a las muestras RF-10, obteniendo una deformación unitaria máxima sobre una presión de 1000Kp del 8% al 10% y una deformación residual al descargar las muestras del 4% al igual que las muestras RF-10.

Es decir, su capacidad de compresión aumenta ligeramente y su capacidad de resiliencia se mantiene constante con respecto a las muestras RF-10 (Tabla 12a y Tabla 12b) (Figura. 21).

3.3.1.2.3 MUESTRAS RF-50

RF-50 M1

Presión (kPa)	L final (μ)	Asiento (μ)	Altura Hf (μ)	Altura poros (μ)	e	Def. unit. (%)
0	9461	0	35000	7610	0,27	0,00
5	8721	740	34260	6870	0,25	2,11
10	8071	1390	33610	6220	0,22	3,97
20	7365	2096	32904	5514	0,20	5,99
50	6155	3306	31694	4304	0,15	9,45
100	5321	4140	30860	3470	0,12	11,83
200	4343	5118	29882	2492	0,09	14,62
500	2999	6462	28538	1148	0,042	18,46
1000	1922	7539	27461	71	0,003	21,54
100	3125	6336	28664	1274	0,047	18,10
10	4760	4701	30299	2909	0,106	13,43
0	5551	3910	31090	3700	0,135	11,17

Tabla 13 a: Resultados M1 RF-50 en ensayo de Edometría

RF-50 M2

Presión (kPa)	L final (m)	Asiento (m)	Altura Hf (m)	Altura poros (m)	e	Def. unit. (%)
0	9400	0	35000	7610	0,27	0,00
5	9220	180	34820	7430	0,27	0,51
10	9179	221	34779	7389	0,27	0,63
20	9080	320	34680	7290	0,26	0,91
50	7985	1415	33585	6195	0,23	4,04
100	7093	2307	32693	5303	0,19	6,59
200	6065	3335	31665	4275	0,16	9,53
500	4665	4735	30265	2875	0,10	13,53
1000	3585	5815	29185	1795	0,07	16,61
100	5968	3432	31568	4178	0,15	9,81
10	6490	2910	32090	4700	0,17	8,31
0	7299	2101	32899	5509	0,20	6,00

Tabla 13 b: Resultados M2 RF-50 en ensayo de Edometría

Curva índice de poros frente a presión efectiva vertical RF-50

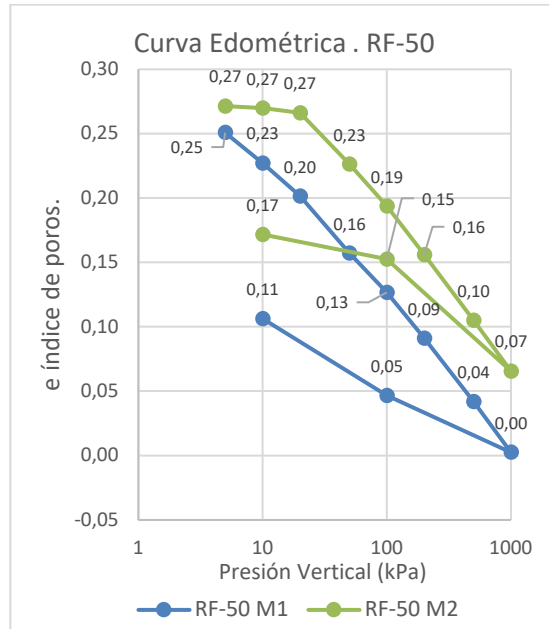


Figura 21: Gráfico Índice de poros frente a presión efectiva, Muestra M1 RF-50

En las muestras RF-50 M1 y RF-50 M2, se cuantificaron variaciones considerables respecto a las muestras RF-10 y RF-25, iniciando su comportamiento elástico a partir de la presión de 50 KPa (Tabla 13a y Tabla 13b).

Se obtuvieron unas deformaciones unitarias en su ciclo de carga para una presión máxima de 1000Kpa del 16% al 21,5% y una deformación residual al descargar las muestras del 6% al 11% (Figura 21), duplicando su deformación unitaria respecto al ciclo de carga de las muestras RF-10 y RF-25.

3.3.1.2.4 MUESTRAS RF-50

M1 RF-75

Presión (kPa)	L final (μ)	Asiento (μ)	Altura (μ)	Altura poros (μ)	e	Def. unit. (%)
0	8630	0	35000	7549	0,27	0,00
5	8599	31	34969	7518	0,27	0,09
10	8501	129	34871	7420	0,27	0,37
20	8071	559	34441	6990	0,25	1,60
50	6898	1732	33268	5817	0,23	4,95
100	5610	3020	31980	4529	0,16	8,63
200	4238	4392	30608	3157	0,11	12,55
500	2440	6190	28810	1359	0,05	17,69
1000	1115	7515	27485	34	0,00	21,47
100	3460	5170	29830	2379	0,08	14,77
10	6228	2402	32598	5147	0,18	6,86
0	7035	1595	33405	5954	0,21	4,56

Tabla 14 a: Resultados M1 RF-75 en ensayo de Edometría.

M2 RF-75

Presión (kPa)	L final (μ)	Asiento (μ)	Altura (μ)	Altura poros (μ)	e	Def. unit. (%)
0	9650	0	35000	7549	0,27	0,00
5	9541	109	34891	7440	0,27	0,31
10	9465	185	34815	7364	0,26	0,53
20	9390	260	34740	7289	0,26	0,74
50	8362	1288	33712	6261	0,22	3,68
100	7265	2385	32615	5164	0,18	6,81
200	5962	3688	31312	3861	0,14	10,54
500	4565	5085	29915	2464	0,09	14,53
1000	3004	6646	28354	903	0,03	18,99
100	5251	4399	30601	3150	0,11	12,57
10	7488	2162	32838	5387	0,19	6,18
0	8642	1008	33992	6541	0,23	2,88

Tabla 14 b: Resultados M2 RF-75 en ensayo de Edometría

Curva índice de poros frente a presión efectiva vertical RF-75

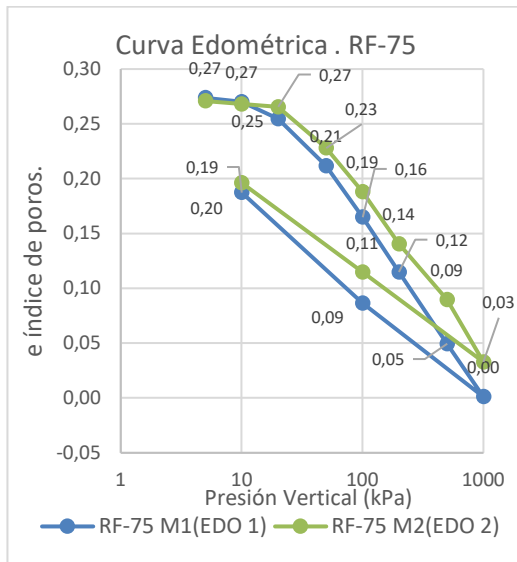


Figura 22: Gráfico Índice de poros frente a presión efectiva, Muestra M1 RF-75

Las muestras RF-75 M1 y RF-75 M2 (Figura-22) tienen un comportamiento similar a las muestras RF-50 (Tabla 14 a y 14 b). A pesar de tener un 25% más en su volumen de granulado de NFU, sus deformaciones unitarias al final de su ciclo de carga (1000Kpa) son muy similares, con un rango de valores entre el 19% y el 21,5%. Respecto a sus deformaciones residuales, al final del ciclo de descarga, sus valores se reducen a la mitad respecto a las muestras RF-50 con un rango comprendido entre el 3% al 4,5% de deformación.

Es decir, la capacidad de compresión de la muestra se mantiene, pero la capacidad de resiliencia aumenta respecto las muestras RF-50.

3.3.1.3 GRÁFICAS COMPARATIVAS DE LAS CURVAS EDOMÉTRICAS DE LAS MUESTRAS MIXTAS DE ALBERO Y NFU

- Índice de poros frente a presión efectiva vertical RF-10 M1, RF-25 M1, RF-50 M1, RF-75 M1

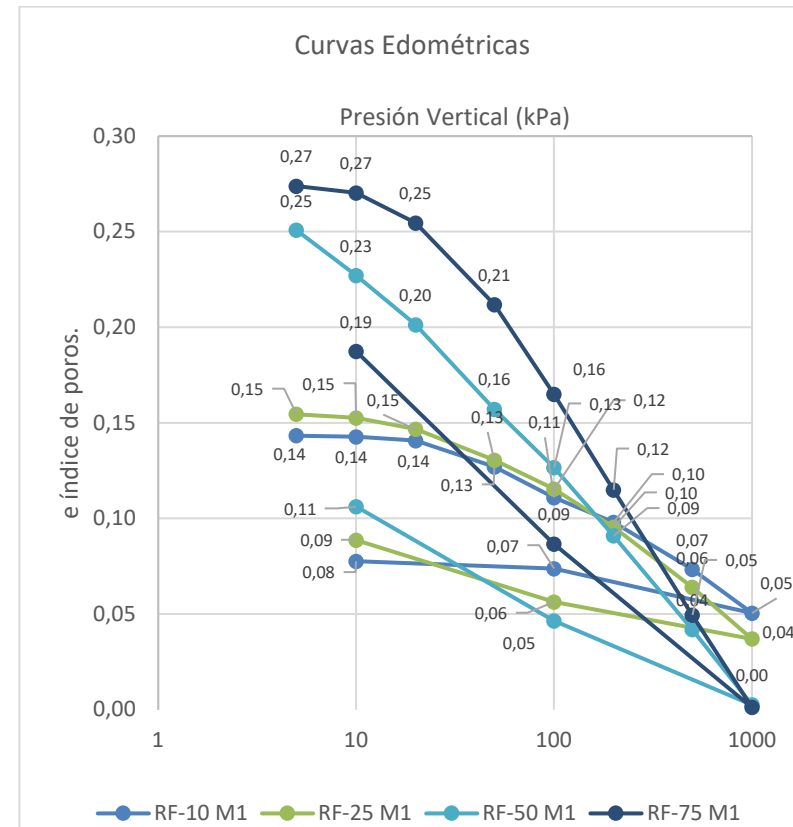


Figura.23 a: Curva comparativa: índice de poros frente a presión efectiva vertical RF-10 M1, RF-25 M1, RF-50 M1, RF-75 M1

- Curva comparativa: índice de poros frente a presión efectiva vertical RF-10 M2, RF-25 M2, RF-50 M2, RF-75 M2

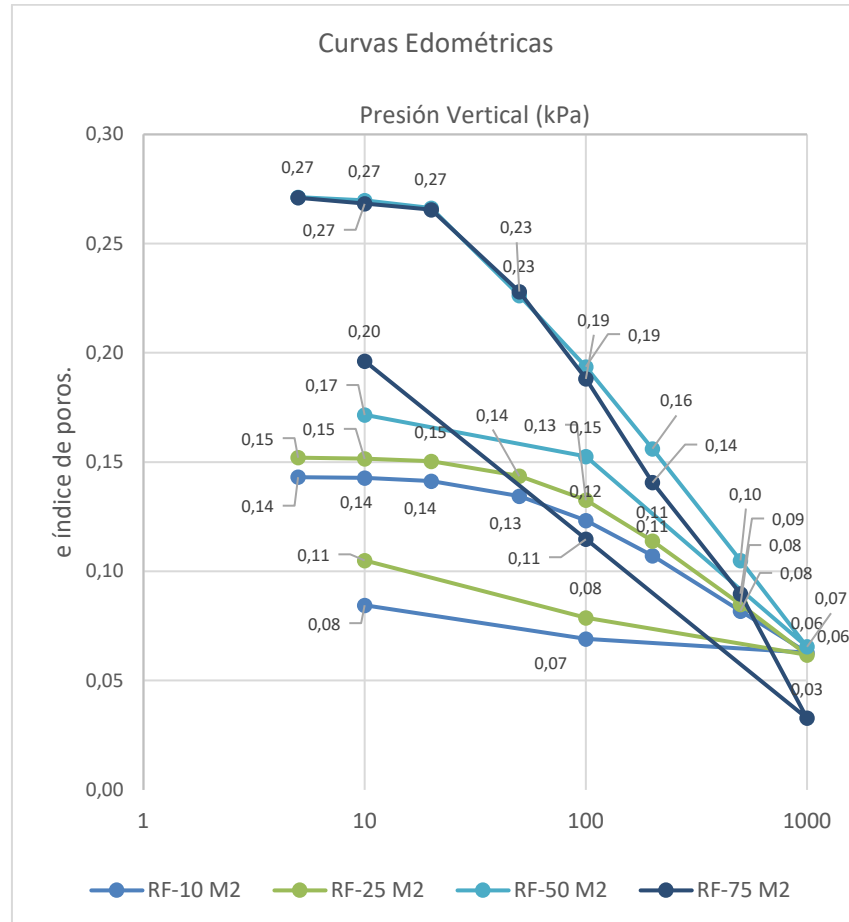


Figura.23b: Curva comparativa: índice de poros frente a presión efectiva vertical RF-10 M2, RF-25 M2, RF-50 M2, RF-75 M2

En el análisis comparativo de las curvas granulométricas RF-10, RF-25, RF-50 y RF-75 (Figura.23a y Figura.23b) se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Las muestras con menor porcentaje de granulado de NFU, RF-10 y RF-25 tienen comportamientos similares, ambas muestras tienen un comportamiento plástico hasta la presión de 100Kpa. A partir de 100 KPa empiezan a tener un comportamiento elástico hasta el final de su ciclo de carga (1000Kpa) con deformaciones unitarias comprendidas del 7% al 8% y deformaciones residuales del 4% (deformación permanente de las muestras una vez descargadas de presiones).

Las muestras con mayor porcentaje de granulado de NFU, RF-50 y RF-75 también tienen comportamientos similares. Ambas muestras reducen su comportamiento plástico hasta la presión de 50Kpa. A partir de 50 KPa empiezan a tener un comportamiento elástico hasta el final de su ciclo de carga (1000Kpa) con deformaciones unitarias comprendidas entre el 16% y el 21% y deformaciones residuales del 6% al 11% para las muestras RF-50 y del 2,8% al 4,5% para las muestras RF-75. Es decir, la capacidad de compresión de las muestras RF-50 Y RF-75 se mantienen, pero la capacidad de resiliencia de las muestras RF-75 aumenta al aumentar un 25% el volumen de NFU respecto la muestra RF-50.

Al analizar los valores de los índices de compresión, hinchamiento y el % de recuperación de las muestras una vez descargadas de presiones (Tabla 15), se puede afirmar que a medida que aumenta el porcentaje de NFU en las muestras, aumenta su capacidad de compresión y recuperación una vez descargada de presiones. Esto es debido a la capacidad elástica del granulado de NFU.

Muestras	Cc	Cs	% Recuperación
RF-10	0,4	0,66	16%
RF-25	0,51	0,176	34%
RF-50	1,14	0,515	49%
RF-75	1,19	1	84%

Tabla 15: Índice de compresión, índice de hinchamiento y % de recuperación de las muestras.

Por último, se han valorado los resultados de las muestras de mayor porcentaje de granulado de NFU, RF-75 M1 y RF-75 M2 con referencia a publicaciones realizadas con muestras del 100% de granulado de NFU (Figura.24):

“Las deformaciones verticales fueron cercanas al 45% bajo una tensión normal de 400 kPa. Estos valores son muy similares a los deducidos en estudios previos de muestras de TDA (Hudson et al, 2003). Sin embargo, estas deformaciones son muy importantes en comparación con las que se obtienen habitualmente en los estudios de compresibilidad del suelo” (Estaire, 2010).

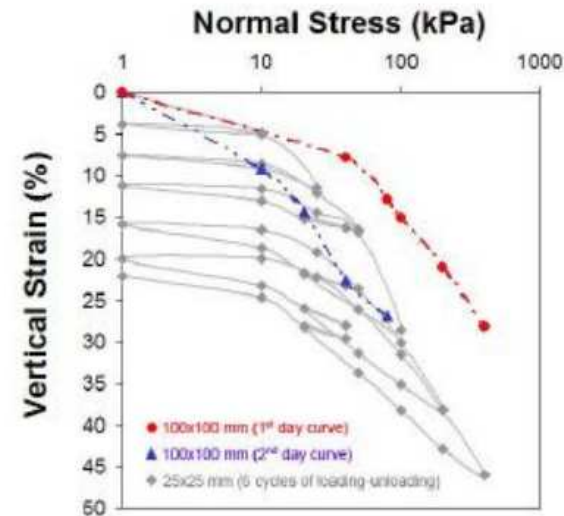


Figura.24: Curvas edométrica, 25mm 100%NFU. Fuente: Figura.4, Estaire,J (2010)

Estaire,J en su artículo, concluye que para muestras de 100% de granulado de NFU, para una carga de 400Kpa, la muestra adquiere una deformación cercanas al 45% (Figura.24), mientras que nuestras muestras RF-75 para cargas de 500Kpa adquiere una deformación unitaria comprendida entre el 14,5% y el 17,7%.

Es decir, que para muestras de granulado de NFU donde se incorpora en su volumen un porcentaje de albero del 25% se reduce su deformación unitaria un 40% respecto a las muestras 100% de NFU. Por lo que el albero influye en el NFU reduciendo su capacidad de deformación.

3.2.2 ENSAYO DE PERMEABILIDAD

Con el objetivo de determinar la capacidad y el coeficiente de permeabilidad de las cuatro muestras mixtas de NFU y albero, se llevó a cabo una campaña de ensayo de permeabilidad bajo carga hidráulica constante y flujo ascendente (Figura 22), usando para ello un permeámetro de pared rígida (Figura 24).

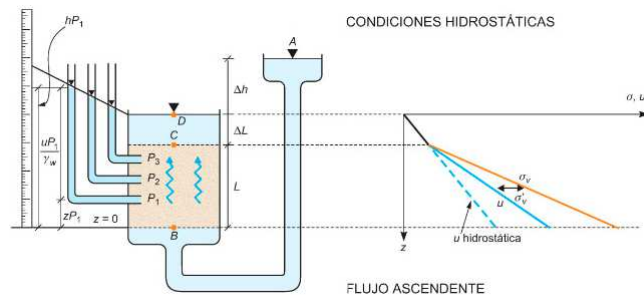


Figura 25. Esquema cálculo permeabilidad con carga constante y flujo ascendente. Gonzales de Vallejo. Ingeniería geológica, 2002

Para ello se realizó una campaña de seis ensayos por cada tipo de muestra, haciendo un total de veintidós ensayos de permeabilidad.

3.2.2.1 PREPARACIÓN DEL ENSAYO DE PERMEABILIDAD

Para llevar a cabo el ensayo de Permeabilidad en el laboratorio (Figura 25), de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 17892-11:2020, contamos con los siguientes elementos:

- Permeámetro o célula de permeabilidad: Compuesto por un cuerpo cilíndrico, en nuestro caso de material plástico transparente con un diámetro interior de 73,3mm, con tres

aberturas equidistantes conectadas a los tubos piezométricos.

La célula está compuesta por una base y una cabeza metálica resistente a la corrosión ajustada al cuerpo cilíndrico mediante unos tornillos para asegurar la estanqueidad de la probeta y un pistón que atraviesa el centro de la cabeza de la célula que permite bloquear la muestra en cualquier posición vertical mediante un tornillo de ajuste.

En el interior de la célula hay dos placas perforadas, una situada en la base y otra en la parte inferior del pistón junto con dos orificios de entrada y salida del flujo hidráulico, uno en la cabeza y otra en la base. (Figura 26)

- Depósito de agua desaireada: Depósito de agua, de altura regulable capaz de mantener la carga hidráulica constante respecto a la célula de permeabilidad.
- Tablero con tres tubos piezométricos graduados y escalados en nuestro caso en cm. Cada tubo piezométrico está conectado a una salida del cuerpo cilíndrico del permeámetro mediante tuberías flexibles de plástico.
- Recipiente de descarga graduada, con una capacidad de 1000ml.

La célula de permeabilidad se prepara vertiendo la muestra de suelo secado al aire en tres tongadas, realizando una pequeña compactación. Se nivela la superficie y se cierra herméticamente la célula, se procede a abrir la llave del suministro de agua desaireada cuyo depósito estará siempre a la misma altura para que la carga hidráulica se mantenga constante durante los ensayos,

se dejan abrir las llaves hasta que la muestra se sature y se estabilicen los niveles de agua en los tubos piezométricos. Una vez nivelado el agua de los tubos piezométricos, se coloca una probeta graduada de capacidad 1000ml en la salida del permeámetro dando comienzo el ensayo. Para ello se mide con un cronometro el intervalo de tiempo en recoger en la probeta un caudal de (mm): 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 1000 y los niveles de agua en los tubos piezométricos h_a , h_b y h_c (Figura 27)

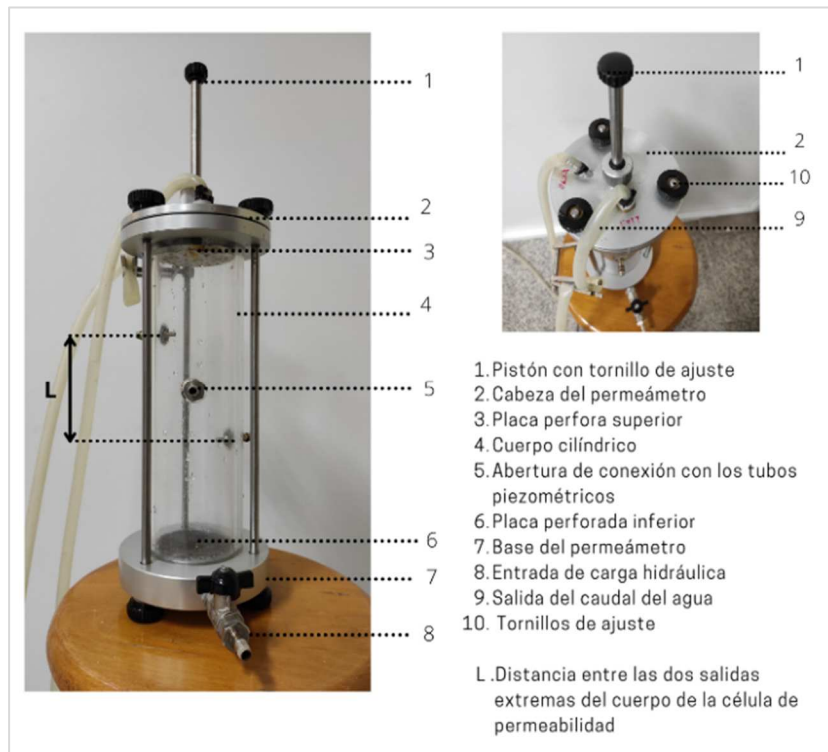


Figura.26: Elementos que componen el permeámetro de pared rígida. Elaboración propia.



Figura.27: Componentes del equipo del ensayo de permeabilidad. Elaboración propia.

3.2.2.2 CÁLCULOS Y RESULTADOS:

Tras la realización de la campaña de ensayos de permeabilidad formada por seis ensayos de las muestras RF-25, RF-50, RF-75 y una serie de cuatro ensayos consecutivos respecto a la muestra RF-10, se ha podido obtener el gradiente hidráulico y el coeficiente de permeabilidad de cada una de las muestras mixtas de albero y NFU.

Se define el gradiente hidráulico (i) como la fracción entre las diferencias de niveles de los tubos piezométricos para un tiempo y un caudal determinado y la distancia entre las dos salidas extremas del cuerpo de la célula de permeabilidad, siendo expresado por la ecuación (Ec.10).

$$i = \frac{H}{L} \quad (\text{Ec. 10})$$

Siendo H : diferencia de niveles de los tubos piezométricos expresado en mm; (Figura.26).

L : Distancia expresada en mm entre las dos salidas extremas sobre el cuerpo de la célula de permeabilidad. (Figura.25).

Se define el coeficiente de permeabilidad, k (m/s) como la capacidad de un suelo de permitir que un flujo lo atravesase sin alterar su estructura interna y viene descrito por la ecuación (Ec.11):

$$K = \frac{q \times Rt}{i \times A} \quad (\text{Ec. 11})$$

Siendo el caudal medio expresado en ml/s: $q = \frac{Q}{t}$

R_t : el factor de corrección de la viscosidad del agua por la temperatura. En nuestro caso la temperatura durante el ensayo de laboratorio fue constante a 22°C con un factor de corrección $R_t=0.96$.

A : Área media de la muestra, mm² calculada con el diámetro D del cuerpo cilíndrico del permeámetro

Φ medio muestra (mm), D	73,3
Área media muestra (mm ²), A	4217,7
Altura media muestra (mm), L	169,5

Obteniendo tras las campañas de ensayos el coeficiente de permeabilidad de cada uno de los ensayos realizados a las cuatro muestras (Tabla 16 a), siendo el valor medio de permeabilidad de cada muestra los valores expresados en la (Tabla 16 b) y los valores medio de gradiente hidráulico los expresados en la (Tabla 17).

Ensayos	RF-10	RF-25	RF-50	RF-75
	Permeabilidad K(m/s)	Permeabilidad K(m/s)	Permeabilidad K(m/s)	Permeabilidad K(m/s)
P1	0,000008	0,000129	0,000203	0,000374
P2	0,000012	0,000105	0,000368	0,000351
P3	0,000011	0,000103	0,000336	0,000423
P4	0,000008	0,000095	0,000297	0,000347
P5		0,000088	0,000251	0,000339
P6		0,000081	0,000221	0,000342

Tabla 16 a. Resultados ensayo de permeabilidad. Coeficiente de permeabilidad.

Muestras	Coefficiente de Permeabilidad Media K(m/s)
RF-10	9,461 E-06
RF-25	9,986 E-05
RF-50	2,791 E-04
RF-75	3,625 E-04

Tabla 16 b. Resultados ensayo de permeabilidad. Coeficiente de permeabilidad media

Muestras	Gradiente Hidráulico (i)
RF-10	6,46
RF-20	3,62
RF-50	4,55
RF-75	4,55

Tabla 17. Resultados ensayo de permeabilidad. Gradiente hidráulico medio

Tras concluir la serie de ensayos de permeabilidad respecto a las cuatro muestras mixtas de NFU y albero para caracterizarlas hidráulicamente, la primera observación destacable durante los ensayos fue el tiempo que tardan las muestras en ser saturadas antes de comenzar dicho ensayo.

Los suelos RF-50 y RF-75 es decir aquellos que tienen mayor porcentaje de NFU (50% o el 75% de su volumen compuesto por NFU), el tiempo de saturación de las muestras es muy rápido, menor a un minuto. A medida que el porcentaje NFU disminuye, aumenta el tiempo necesario para saturar la muestra antes de comenzar el ensayo. La muestra RF-25 fue saturada en 20 minutos

y la muestra RF-10 al ser la que menos porcentaje de NFU posee en sus granulometrías, tuvo un tiempo de saturación comprendido entre las dos y tres horas (Tabla 18).

Suelos Mixtos	T. saturación de la muestra
RF-10 (10%NFU+90%Albero)	2 -3 horas
RF-25 (25%NFU+75%Albero)	20 minutos
RF-50 (50%NFU+50%Albero)	≤ 1minuto
RF-75 (75%NFU+25%Albero)	≤ 1minuto

Tabla 18: Tiempo de saturación de la muestra en los ensayos de permeabilidad

Tras los resultados obtenido en los ensayos respecto al coeficiente de permeabilidad de las cuatro muestras y su representación gráfica (Figura.28), podemos afirmar que coeficiente de permeabilidad crece de manera lineal a medida que aumenta el porcentaje de NFU en la granulometría de las muestras y disminuye su tiempo de saturación.

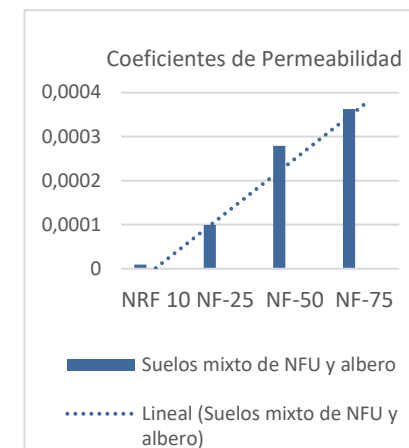


Figura.28: Grafica coeficientes de permeabilidad.

Para la muestra tipo RF-10 los coeficientes de permeabilidad se encuentran en un rango comprendido entre $8x10^{-6}$ y $1,1x10^{-5}$, de acuerdo con el Código técnico de la edificación CTE-S Tabla D-28 (Figura.28) se trataría de una muestra con una permeabilidad moderada en relación a una arena fina, limos.

Tabla D.28. Valores orientativos del coeficiente de Permeabilidad

Tipo de suelo	k_z (m/s)
Grava limpia	$> 10^{-2}$
Arena limpia y mezcla de grava y arena limpia	$10^{-2} - 10^{-5}$
Arena fina, limo, mezclas de arenas, limos y arcillas	$10^{-5} - 10^{-9}$
Arcilla	$< 10^{-9}$

Figura 28: *Valores orientativos del coeficiente de permeabilidad.* CTE.C Tabla D.28

Las muestras RF-25 se encuentran en un rango comprendido entre $8,1x10^{-5}$ y $1,29x10^{-4}$, su coeficiente de permeabilidad aumenta respecto a la muestra RF-10 aunque continúa siendo una permeabilidad moderada-alta similar a una arena limpia.

Con respecto las muestras con un porcentaje más alto de NFU en su granulometría se cuantificó un aumento considerable en su coeficiente de permeabilidad. Las muestras RF-50 su coeficiente de permeabilidad se encuentra en un rango comprendido entre $2.03x10^{-4}$ y $3.68x10^{-4}$, poseen una permeabilidad alta, pudiéndose clasificar como mezcla de gravas, arenas limpias. Sin duda alguna se observó un cambio significativo respecto las muestras RF-10 Y RF-25 con un aumento significativo en la capacidad de permeabilidad.

Para las muestras RF-75 su coeficiente de permeabilidad se encuentra en un rango comprendido entre $3,39x10^{-4}$ y $4,23x10^{-4}$, poseen una permeabilidad alta, pudiéndose clasificar como mezcla de gravas al igual que la muestra RF-50.

4. REFLEXIONES FINALES:

4.1 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS:

En relación a los resultados reportados anteriormente en los cuales se realizó un análisis de las propiedades hidráulicas y diseño de diferentes muestras mixtas de albero y granulado de NFU, se extraen las siguientes conclusiones:

- Al aumentar la fracción de NFU en las muestras, aumenta su humedad seca con valores comprendidos entre 14,5% - 25,5%, valores similares a los de una arena.
- Tras los resultados que se obtuvieron en los ensayos de edometría respecto a la densidad seca de las muestras, se obtuvieron valores comprendido ente $0,45 \text{ gr/cm}^3$ y $0,9 \text{ gr/cm}^3$ muy similares a los valores de una arcilla.
- En la relación presión-deformación, se observó que las muestras con menor porcentaje de NFU, RF-10 y RF-25 tienen comportamientos similares, con deformación unitarias pequeña del 7% al 8% y deformaciones residuales del 4%, mientras que las muestras con mayor

porcentaje de granulado de NFU, RF-50 y RF-75 también tienen comportamientos similares, con un mayor comportamiento elástico, con deformación unitarias máximas comprendidas del 16% al 21% y deformaciones residuales del 6% al 11% para las muestras RF-50 y del 2,8% al 4,5% para las muestras RF-75. Es decir, la capacidad de compresión de las muestras RF-50 y RF-75 se mantienen, pero la capacidad de resiliencia de la muestra RF-75 aumenta al aumentar un 25% el volumen de NFU respecto la muestra RF-50.

- La Muestras RF-75 donde se incorpora en su volumen un porcentaje de albero del 25%, reduce su deformación unitaria un 40% respecto a las muestras 100% de NFU, por lo que el albero influye en el NFU reduciendo su capacidad de deformación.
- Respecto a la consolidación de las muestras, se observó que a medida que aumenta el porcentaje de NFU, aumenta el índice de compresión, el índice de hinchamiento y por lo tanto el porcentaje de recuperación de las muestras al ser descargadas. Por ello se concluye que al aumentar la fracción de caucho, aumenta la capacidad de resiliencia de la muestra y se obtienen materiales más elásticos.
- En lo que se refiere a la permeabilidad de las muestras, se observó que el coeficiente de permeabilidad crece de manera lineal a medida que aumenta la proporción de

caucho en la muestra. Las muestras con bajo contenido de NFU, RF-10 y RF-25 tienen una permeabilidad moderada con rangos cercanos a arenas limpias. Y las muestras con una fracción mayor de NFU, RF-50 y RF-75 tienen una permeabilidad alta, pudiéndose clasificar como mezcla de grabas.

4.2 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN:

Siguiendo la línea de investigación de este PFG y teniendo en cuenta el periodo de tiempo en el que se desarrolla esta investigación, se sugiere finalizar los ensayos de edometría realizando un ensayo a compresión simple de las probetas de las muestras, una vez finalizados los ensayos de edometría.

Se propone el estudio de muestras mixtas de albero y granulado de NFU como rellenos de taludes... y se propone evaluar los empujes que producen frente a otros rellenos tradicionales.

Finalmente siguiendo la línea de investigación de este PFG se podrían diseñar nuevas mezclas con otros suelos convencionales, como podrían ser las arcillas y evaluar su comportamiento hidráulico.

5. REFERENCIAS:

5.1 BIBLIOGRAFÍA:

SIGNUS. 2017. *Plan de gestión de neumáticos fuera de uso (2017-2024)*, Madrid.

GONZALEZ DE VALLEJO, L; MERCEDES FERRER, L; OTEO, C. 2002. *Ingeniería geológica*. Madrid. ISBN:84-205-3104-9.

JARAMILLO MORILLA, A., & ANGUITA GARCÍA, M. *Proyecto GREENECO. Granulado Reciclado de Neumáticos para la Construcción*. Ministerio de ciencia, innovación y universidades.

CONTRERAS MARIN, E., ANGUITA GARCÍA, M., ALONSO GUZMÁN, E.M., JARAMILLO MORILLA, A., MASCORT ALBEA, E.J Y ROMERO HERNÁNDEZ, R. 2020. *Propiedades mecánicas del granulado de neumáticos fuera de uso: Proctor normal y modificado*. Rehabilitation Technology and Heritage Management. Granada. Recuperado de: <https://idus.us.es/handle/11441/102759?show=full>.

SAN MARTÍN VALDOR, I., ARROYO ALVAREZ DE TODELO, M., LLORET MORANCHO, A., 2009. Caracterización de neumáticos fuera de uso troceado para su reciclado en obra civil. *Universidad politécnica de Cataluña*.

EDUARDO VILLARRAGA, J., LORENA DIAZ, K., GONZALO, A., MARTINEZ, R. Determinación de la conductividad hidráulica en muestras de arena con diferentes contenidos de óxidos de hierro usado un permeámetro ksat de última generación. *Universidad Piloto de Colombia*.

AGUILERA NOGUEROL, M. 2019. *Diseño experimental de suelos con materiales mixtos: tierra y granulado de neumático fuera de uso (NFU)*. <https://idus.us.es/handle/11441/89574>

RODRIGUEZ ABAD, R., ESTAIRE, J. *Geotechnical and environmental properties of tire used shreds for use in civil construction*. 2010 .6th International Congress on Environmental Geotechnics. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0000027>.

CANO SERRANO, E., CEREZO GÁRCIA, L. 2007. *Valoración material y energética de neumáticos fuera de uso*. Informe de vigilancia Tecnológica. ISBN: 9878-84-611-8343-2

ESTAIRE, J. 2010. *Geotechnical and environmental properties of tire-used shreds for use in civil construction*. Centro de Estudios y Experimentation de Obras Públicas.

5.2 NORMATIVAS

UNE-EN ISO 17892-11. Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorios de suelos. Parte 11: Ensayos de permeabilidad, 2020.

UNE-EN ISO 17892-5. Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorios de suelos. Parte 5: Ensayo edométrico de carga incremental, 2019.

UNE-EN ISO 17892-2. Investigación y ensayos geotécnicos.
Ensayos de laboratorios de suelos. Parte 2: Determinación de la densidad aparente, 2015.

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.

5.3 WEB:

<https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/web/guest/home?categoryVal=>