

## CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS: PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU's)

Elizabeth Contreras Marín

La siguiente investigación presenta un protocolo basado en la caracterización de un rango detallado de tamaños de partículas ( $\leq 12\text{mm}$ ) de NFU's y sus posibles usos en aplicaciones geotécnicas. Este enfoque pretende aportar una solución al problema del exceso de almacenamiento de esta granulometría en las plantas de tratamiento. Con ello se pretende contribuir a las iniciativas encaminadas a favorecer la incursión de materiales reciclados en la sostenibilidad del sector de la construcción.

La novedad que plantea esta investigación, se centra en el análisis específico de una serie de granulometrías y mezclas de las mismas, de material no cohesivo, para caracterizar en laboratorio, obteniendo así parámetros geotécnicos a partir de los valores característicos, llevando a cabo correlaciones de los datos obtenidos en el laboratorio a aplicaciones en campo, de acuerdo con las especificaciones del Código Técnico Español (CTE-DB-SE-C) y del Eurocódigo (EC7-1).

Palabras clave: valores característicos de los granulados de NFU's, influencia del tamaño de partícula, correlación entre propiedades y las aplicaciones geotécnicas de los NFU's.

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS:  
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU's)  
Elizabeth Contreras Marín



**CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS:  
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU's)**  
Elizabeth Contreras Marín





# CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS: PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU's)

TESIS DOCTORAL. Enero 2022

Elizabeth Contreras Marín

Tutor: Antonio Jaramillo Morilla

Directores: Antonio Jaramillo Morilla y Elia Mercedes Alonso Guzmán

*Programa de Doctorado en Arquitectura. Línea Transversal 1. Proyecto, edificación,  
puesta en obra y mantenimiento*

Departamento de Estructuras de la Edificación e Ingeniería del Terreno

## **Agradecimientos**

*Este trabajo es fruto de una suma de apoyos a lo largo de cinco años. A todas las personas que, aunque no sean conscientes de ello, han hecho posible finalizar esta Tesis, les doy mil gracias.*

*A la Universidad de Sevilla y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.*

*A mis directores el Dr. Antonio Jaramillo Morilla y Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por su experiencia e inspiración.*

*Al grupo de investigación TEP-018 Ingeniería del Terreno de la Universidad de Sevilla (US), por hacerme parte del equipo.*

*Al Laboratorio de Mecánica de la ETSA (Escuela Técnica Superior de Arquitectura) de la Universidad de Sevilla, por la oportunidad de utilizar el equipo y maquinaria necesaria para las pruebas realizadas.*

*En relación a la financiación recibida, se agradece al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, US; Ayudas de Internacionalización IUACC del VI Plan Propio de Investigación y Transferencia de la Universidad 2019.*

*A SIGNUS por contribuir con el material para realizar las pruebas.*

*A mi familia, mis amigos y compañeros, les agradezco haberme apoyado en todo momento.*

*A todos, muchas GRACIAS.*

## INDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>8</b>
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES .....</b>	<b>10</b>
<b>SÍMBOLOS Y DEFINICIONES .....</b>	<b>11</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>14</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN: UNA APROXIMACIÓN A LOS MATERIALES RECICLADOS .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2. ASPECTOS GENERALES DE LOS ÁRIDOS .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS .....</b>	<b>20</b>
<b>1.4. IMPACTOS DE LA EDIFICACIÓN: MATERIALES Y RESIDUOS.....</b>	<b>22</b>
1.4.1. SOSTENIBILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN.....	23
1.4.2. CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES EN LOS ÁRIDOS RECICLADOS .....	24
<b>2. PLANTEAMIENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1. HIPÓTESIS Y PREGUNTAS DE PARTIDA.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1. OBJETIVOS.....</b>	<b>27</b>
2.1.1. OBJETIVO PRINCIPAL.....	27
2.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	27
<b>2.2. VIABILIDAD DE LA PROPUESTA .....</b>	<b>29</b>
2.2.1. INTERÉS EN EL CASO DE ESTUDIO.....	29
2.2.2. GRADO DE RELEVANCIA E INNOVACIÓN .....	31
<b>2.3. PLAN DE TRABAJO Y METODOLOGÍA .....</b>	<b>32</b>
2.3.1. DISEÑO DEL EXPERIMENTO .....	34
2.3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	35
2.3.3. ENTORNO DEL ESTUDIO.....	36
2.3.4. UNIVERSO DE LA MUESTRA.....	37
<b>2.4. TRAYECTORIA INVESTIGADORA.....</b>	<b>39</b>
<b>3. RESIDUO DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD'S).....</b>	<b>40</b>
<b>3.1. PROBLEMAS DE LA VALORIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS RCD'S .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2. CLASIFICACIÓN, COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS RCD'S.....</b>	<b>42</b>
3.2.1. DEFINICIÓN DE LOS ÁRIDOS DE RCD'S .....	42
3.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ÁRIDOS RCD'S .....	43
3.2.3. COMPOSICIÓN DE LOS ÁRIDOS RCD'S .....	45
3.2.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS RCD'S .....	46

3.2.5.	PLANTAS DE TRATAMIENTO Y VALORIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS RCD'S .....	48
<b>3.3.</b>	<b>EUROPA Y ESPAÑA: ÁRIDOS RCD'S.....</b>	<b>49</b>
3.3.1.	MARCO LEGAL Y RÉGIMEN JURÍDICO EUROPEO DE RCD'S .....	49
3.3.2.	SITUACIÓN EN EUROPA.....	51
3.3.3.	SITUACIÓN EN ESPAÑA .....	52
<b>4.</b>	<b>RESIDUOS INDUSTRIALES: GRANULADOS DE NFU'S.....</b>	<b>53</b>
<b>4.1.</b>	<b>ASPECTOS GENERALES DE LA INDUSTRIA DE LOS NFU'S.....</b>	<b>53</b>
4.1.1.	PROBLEMÁTICA DE LA INDUSTRIA DE LOS NEUMÁTICOS .....	53
4.1.2.	IMPACTO DEL USO DE GRANULADOS DE NFU'S .....	56
4.1.3.	LA ECONOMÍA CIRCULAR DE LOS NFU'S.....	57
4.1.4.	MERCADO DE LOS GRANULADOS DE NFU'S.....	59
<b>4.2.</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU'S) .....</b>	<b>60</b>
4.2.1.	NOMENCLATURA DE LOS NFU'S.....	60
4.2.2.	PRINCIPALES COMPONENTES DE LOS NFU'S .....	64
4.2.3.	ESTRUCTURA DE UN NEUMÁTICO .....	65
4.2.4.	PROPIEDADES FÍSICAS NFU'S.....	66
4.2.5.	PROPIEDADES MECÁNICAS NFU'S .....	68
4.2.6.	PROPIEDADES QUÍMICAS NFU'S.....	70
<b>5.</b>	<b>MARCO NORMATIVO Y GESTIÓN DE LOS MATERIALES RECICLADOS .....</b>	<b>72</b>
<b>5.1.</b>	<b>GRANULADOS DE NFU'S COMO RESIDUO .....</b>	<b>73</b>
5.1.1.	GESTIÓN DE NFU'S.....	73
5.1.2.	MARCO NORMATIVO NACIONAL DE LOS NFU'S.....	75
<b>5.2.</b>	<b>GRANULADOS DE NFU'S Y SUS POSIBLES APLICACIONES .....</b>	<b>79</b>
5.2.1.	CWA 14243-2002 POST - CONSUMER TYRE MATERIALS AND APPLICATIONS (Post- CONSUMO DE NEUMÁTICOS, MATERIALES Y APLICACIONES).....	79
5.2.2.	ASTM D6270-17 STANDARD PRACTICE FOR USE OF SCRAP TIRES IN CIVIL ENGINEERING APPLICATIONS (PRÁCTICA ESTÁNDAR PARA EL USO DE NEUMÁTICOS DE DESECHO EN APLICACIONES DE INGENIERÍA CIVIL).....	81
5.2.3.	UNE-EN 15732-2014 MATERIALES LIGEROS DE RELLENO Y PRODUCTOS AISLANTES TÉRMICOS PARA APLICACIONES EN INGENIERÍA CIVIL, PRODUCTOS A BASE DE ÁRIDOS LIGEROS DE ARCILLA EXPANDIDA. ....	81
<b>5.3.</b>	<b>PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS (PG-3) .....</b>	<b>82</b>
<b>5.4.</b>	<b>EUROCÓDIGO 7 (EC-7) PROYECTO GEOTÉCNICO.....</b>	<b>88</b>
<b>6.</b>	<b>USOS Y APLICACIONES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS.....</b>	<b>90</b>
<b>6.2.</b>	<b>APLICACIONES DE LOS ÁRIDOS NATURALES .....</b>	<b>90</b>
<b>6.3.</b>	<b>APLICACIONES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS.....</b>	<b>91</b>

<b>6.4. APLICACIONES DE LOS NFU'S .....</b>	<b>93</b>
6.4.2. LOS NFU'S EN APLICACIONES DE INGENIERÍA CIVIL .....	94
6.4.3. FABRICACIÓN DE HORMIGONES CON NFU'S .....	97
6.4.4. RECUPERACIÓN ENERGÉTICA Y MEZCLAS ASFÁLTICAS CON NFU'S .....	99
6.4.5. ELEMENTOS ELÁSTICOS A PARTIR DE CAPAS DE NFU'S .....	100
6.4.6. RELLENOS DE TRASDÓS DE MUROS DE CONTENCIÓN CON GRANULADOS DE NFU'S .....	100
6.4.7. CAPAS DRENANTES Y ABSORBENTES DE RUIDO .....	102
<b>7. FASE EXPERIMENTAL EN LABORATORIO.....</b>	<b>104</b>
<b>7.2. DATOS RELATIVOS A LAS PLANTAS ANALIZADAS .....</b>	<b>105</b>
<b>7.3. DATOS RELATIVOS A LA BASE DE DATOS ANALIZADA .....</b>	<b>106</b>
<b>7.4. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CARACTERIZACIÓN.....</b>	<b>107</b>
<b>7.5. MÉTODOS DE ENSAYO, MUESTRAS Y CONDICIONES DE ENSAYO.....</b>	<b>109</b>
<b>7.6. PROPIEDADES FÍSICAS .....</b>	<b>110</b>
7.6.1. PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y DIMENSIONALES: CURVAS GRANULOMÉTRICAS, LÍMITES DE ATTERBERG 110	
7.6.2. DENSIDADES, PESO ESPECÍFICOS Y ABSORCIÓN DEL GRANULADO DE NFU'S .....	115
7.6.3. RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE HUECOS Y LA DENSIDAD APARENTE PARA LOS GRANULADOS DE NFU'S. 117	
<b>7.7. PROPIEDADES MECÁNICAS .....</b>	<b>119</b>
7.7.1. COMPACTACIÓN (ENSAYO PRÓCTOR).....	119
7.7.2. CORTE DIRECTO .....	123
7.7.3. EDOMETRÍA .....	129
<b>7.8. PROPIEDADES HIDRÁULICAS .....</b>	<b>137</b>
7.8.1. PERMEABILIDAD .....	137
<b>8. FASE EXPERIMENTAL DE PUESTA EN OBRA DEL MATERIAL .....</b>	<b>141</b>
<b>8.1. CRITERIOS EN APLICACIONES A EVALUAR.....</b>	<b>142</b>
<b>8.2. GRANULADO DE NFU'S EN CAPAS DE RELLENOS EN VIARIOS .....</b>	<b>144</b>
8.2.1. PROPUESTA DE ACTUACIÓN .....	148
8.2.2. CARACTERÍSTICAS INTRÍNECAS DEL MATERIAL .....	151
8.1.3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS .....	151
<b>8.3. GRANULADO DE NFU'S EN RELLENOS DE TRASDÓS DE MUROS DE CONTENCIÓN.....</b>	<b>155</b>
8.3.1. PROPUESTA DE ACTUACIÓN .....	156
8.3.2. CARACTERÍSTICAS INTRÍNECAS DEL MATERIAL .....	159
8.3.3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS .....	162
<b>9. VALOR CARACTERÍSTICO DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS.....</b>	<b>165</b>

<b>9.1. APLICACIÓN DE LOS VALORES CARACTERÍSTICOS.....</b>	<b>165</b>
<b>9.2. VALORES CARACTERÍSTICOS: BASE DE DATOS DE OTRAS INVESTIGACIONES DE NFU'S Y MATERIALES CONVENCIONALES .....</b>	<b>167</b>
<b>9.2.1. VALORES CARACTERÍSTICOS DE LOS GRANULADOS DE NFU'S .....</b>	<b>170</b>
<b>9.3. FACTORES DE EQUIVALENCIA DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NFU'S Y COMPARATIVA CON SUELOS CONVENCIONALES. ....</b>	<b>172</b>
<b>10. CONCLUSIONES.....</b>	<b>184</b>
<b>10.1. CONCLUSIONES REFERENTES A LA METODOLOGÍA EMPLEADA .....</b>	<b>184</b>
10.1.1. LÍMITES DE LA INVESTIGACIÓN DESARROLLADA.....	184
<b>10.2. AVANCES ALCANZADOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE LOS GRANULADOS DE NFU'S .....</b>	<b>185</b>
10.2.1. SELECCIÓN DE ELEMENTOS .....	185
10.2.2. RESULTADOS OBTENIDOS .....	186
10.2.3. CONSIDERACIONES SOBRE LAS APLICACIONES RECOMENDADAS .....	189
<b>10.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>192</b>
<b><u>BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>	<b><u>193</u></b>
<b><u>ANEXOS.....</u></b>	<b><u>215</u></b>
<b><u>PLAN DE DIFUSIÓN DE RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN.....</u></b>	<b><u>215</u></b>
<b><u>ANEJOS .....</u></b>	<b><u>219</u></b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

ILUSTRACIÓN 1 PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS (MILLONES DE TONELADAS POR PAÍS) 2015. FUENTE: [6]-----	19
ILUSTRACIÓN 2 PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS PER CÁPITA (MILLONES DE TONELADAS POR PAÍS) 2015. FUENTE: [6]-----	19
ILUSTRACIÓN 3. ESQUEMA GENERAL DEL CICLO DE VIDA DE UNA EDIFICACIÓN. FUENTE: [13] -----	21
ILUSTRACIÓN 4. IMPACTO AMBIENTAL DE LOS PRINCIPALES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN SEGÚN EL PROGRAMA SIMAPRO DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. FUENTE: [15].-----	21
ILUSTRACIÓN 5. JERARQUÍA EN EUROPEA EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS. FUENTE: [29]-----	29
ILUSTRACIÓN 6. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN. FUENTE: [38], [45].-----	45
ILUSTRACIÓN 7. ACOPIOS ABANDONADOS INVENTARIADOS EN ESPAÑA (MAYO 2017) [77, p. 28].-----	55
ILUSTRACIÓN 8. “LA ECONOMÍA CIRCULAR DESDE EL DISEÑO DE NEUMÁTICOS”. FUENTE:[87] -----	58
ILUSTRACIÓN 9. TARIFAS ECOVALOR VIGENTES 2020. FUENTE: [88]-----	59
ILUSTRACIÓN 10. ESQUEMA DEL PROCESO GRANULADO DEL NFU'S. FUENTE: [68].-----	61
ILUSTRACIÓN 11. EJEMPLOS DE PIEZAS DE NFU'S, MUESTRAS RENEAN Y RMD. -----	64
ILUSTRACIÓN 12. CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DE UN NEUMÁTICO. FUENTE: [77, p. 18] -----	66
ILUSTRACIÓN 13. SISTEMAS DE GESTIÓN DE NFU'S A NIVEL EUROPEO. FUENTE: [87] -----	74
ILUSTRACIÓN 14. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS PARA TERRAPLENES SEGÚN LA OC.326/00. FUENTE: [99]-----	86
ILUSTRACIÓN 15. ENSAYO DE LÍMITES DE ATTERBERG DEL GRANULADO DE NFU'S (POLVO D < 0,8 MM).-----	112
ILUSTRACIÓN 16. CURVAS GRANULOMÉTRICAS DEL CONJUNTO DE MUESTRAS DE GRANULADOS DE NFU'S.-----	113
ILUSTRACIÓN 17. CURVAS GRANULOMÉTRICAS INDIVIDUALES DE MUESTRAS DE GRANULADOS DE NFU'S.-----	114
ILUSTRACIÓN 18. ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE DE LA MUESTRA ( $P_B$ ); PARTÍCULAS ( $P_A$ ); SECADAS EN ESTUFA ( $P_{RD}$ ); SATURADAS Y SECAS SUPERFICIALMENTE ( $P_{SSD}$ ); ABSORCIÓN DE AGUA ( $W_{A24}$ ) DE LOS GRANULADOS NFU'S.-----	115
ILUSTRACIÓN 19 -----	118
ILUSTRACIÓN 20. MONTAJE Y DESMONTAJE DEL ENSAYO DE PRÓCTOR DE LOS GRANULADOS NFU'S (MUESTRA $S_7$ ).-----	120
ILUSTRACIÓN 21. RESULTADOS DEL ENSAYO DE PRÓCTOR DE LOS GRANULADOS NFU'S PARA EL CONJUNTO DE MUESTRAS.-----	122
ILUSTRACIÓN 22. RESULTADOS DEL ENSAYO DE PRÓCTOR DE LOS GRANULADOS NFU'S PARA LA MUESTRA $S_2$ .-----	122
ILUSTRACIÓN 23. RESULTADOS DEL ENSAYO DE PRÓCTOR DE LOS GRANULADOS NFU'S PARA LA MUESTRA $S_3$ .-----	122
ILUSTRACIÓN 24 EQUIPO DE CORTE DIRECTO, CAJA DE CIZALLAMIENTO.-----	125
ILUSTRACIÓN 25. GRÁFICO DE DEFORMACIONES HORIZONTALES CONTRA ESFUERZOS TANGENCIALES INDIVIDUALES DE MUESTRAS DE GRANULADOS DE NFU'S.-----	126
ILUSTRACIÓN 26. DISPERSIÓN DE LA COHESIÓN DE LAS COMBINACIONES DE GRANULADO DE NFU'S.-----	129
ILUSTRACIÓN 27. DISPERSIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE LAS COMBINACIONES DE GRANULADO DE NFU'S.-----	129
ILUSTRACIÓN 28. PREPARACIÓN Y MONTAJE DE ENSAYOS EDOMÉTRICOS DEL GRANULADO DE NFU'S.-----	131
ILUSTRACIÓN 29. COMPARACIÓN DE CURVAS EDOMÉTRICAS DE LOS GRANULADOS NFU'S PARA LA MUESTRAS $S_5$ Y $S_6$ .-----	132
ILUSTRACIÓN 30. CICLOS DE CARGA Y DESCARGA EDOMÉTRICOS DE LOS GRANULADOS NFU'S PARA LA MUESTRAS $S_5$ .-----	134
ILUSTRACIÓN 31. PRESIONES VERTICALES VS DEFORMACIONES UNITARIAS, ENSAYO EDOMÉTRICO DE LOS GRANULADOS NFU'S PARA LA MUESTRAS $S_5$ Y $S_6$ .-----	135

ILUSTRACIÓN 32. ENSAYO DE PERMEABILIDAD Y MONTAJE DE LOS GRANULADOS NFU'S. -----	138
ILUSTRACIÓN 33. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE MUESTRAS DE NFU'S EN APLICACIONES GEOTÉCNICAS. FUENTE: [170] ---	143
ILUSTRACIÓN 34. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN TERRAPLÉN CONSTRUIDO SOBRE ARCILLA MARINA BLANDA PARA EL INTERCAMBIADOR DEL PUERTO DE PORTLAND. FUENTE: [187] -----	145
ILUSTRACIÓN 35. EVOLUCIÓN DE LOS DAÑOS Y ASENTAMIENTOS EN VIAL DE ACCESO DE LA URBANIZACIÓN CÁRMENES DEL MAR, ALMUÑÉCAR. NOVIEMBRE 2012-NOVIEMBRE 2014-MARZO 2019. FUENTE: ANTONIO JARAMILLO MORILLA. -----	148
ILUSTRACIÓN 36. DAÑOS Y ASENTAMIENTOS EN VIAL DE ACCESO DE LA URBANIZACIÓN CÁRMENES DEL MAR, ALMUÑÉCAR, ZONA DE ACTUACIÓN. -----	149
ILUSTRACIÓN 37. ASENTAMIENTOS PUNTUALES EN VIAL DE ACCESO DE LA URBANIZACIÓN CÁRMENES DEL MAR, ALMUÑÉCAR. ZONA DE ACTUACIÓN. -----	150
ILUSTRACIÓN 38. GRANULOMETRÍA S <sub>5</sub> (90% S <sub>4</sub> 2,0 – 7,0 + 10% S <sub>2</sub> 0,6 – 2,0 MM), MATERIAL PROPUESTO PARA LA REPARACIÓN DEL VIAL DE ACCESO DE LA URBANIZACIÓN CÁRMENES DEL MAR, ALMUÑÉCAR. -----	151
ILUSTRACIÓN 39. ACOPIO DEL GRANULADO DE NFU'S EN URBANIZACIÓN CÁRMENES DEL MAR COMO SISTEMA DE ALIGERAMIENTO DE PESO EN ZONAS CON ASENTAMIENTOS. -----	152
ILUSTRACIÓN 40. PUESTA EN OBRA DEL GRANULADO DE NFU'S EN URBANIZACIÓN CÁRMENES DEL MAR COMO SISTEMA DE ALIGERAMIENTO DE PESO EN ZONAS CON ASENTAMIENTOS. -----	154
ILUSTRACIÓN 41. ZONA DE ACTUACIÓN, REHABILITACIÓN DEL CASTILLO DE UTRERA, SEVILLA. -----	157
ILUSTRACIÓN 42. PLANTA Y ALZADO, OBRAS DE REHABILITACIÓN DEL CASTILLO DE UTRERA, SEVILLA. FUENTE: [197]. -----	158
ILUSTRACIÓN 43. ACOPIO DE GRANULADO DE NFU'S. (IZQUIERDA PLANTA DE TRATAMIENTO, DERECHA OBRAS DE ACTUACIÓN MURO CASTILLO DE UTRERA). -----	158
ILUSTRACIÓN 44. PUESTA EN MARCHA DEL GRANULADO DE NFU'S, RELLENO DE TRASDOSADO DE MURO EN LA REHABILITACIÓN DEL CASTILLO DE UTRERA, SEVILLA. -----	164
ILUSTRACIÓN 45 PROCEDIMIENTOS DE OBTENCIÓN DE LOS VALORES CARACTERÍSTICOS DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS. FUENTE [207]. -----	166
ILUSTRACIÓN 46. GRÁFICO DE VALORES CARACTERÍSTICOS DE ENSAYO PRÓCTOR DE DENSIDAD SECA MÁXIMA P <sub>D</sub> (kN/M <sup>3</sup> ) DE LOS GRANULADOS DE NFU'S. -----	170
ILUSTRACIÓN 47. GRÁFICO DE VALORES CARACTERÍSTICOS DEL ENSAYO DE CIZALLAMIENTO DE LOS GRANULADOS DE NFU'S: COHESIÓN (kPA).-----	171
ILUSTRACIÓN 48. GRÁFICO DE VALORES CARACTERÍSTICOS DEL ENSAYO DE CIZALLAMIENTO DE LOS GRANULADOS DE NFU'S: ÁNGULO DE ROZAMIENTO (°). -----	171

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. UNIVERSO DE LA MUESTRA: MATERIAL GRANULAR DE NFU'S DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO EN ANDALUCÍA. 37	
TABLA 2. PORCENTAJES DE ELEMENTOS QUE COMPONEN LOS RCD'S. FUENTE: [38]. _____	46
TABLA 3. NORMATIVA INTERNACIONAL SOBRE RCD'S. FUENTE: [41]. _____	50

TABLA 4. PLANTAS DE TRATAMIENTO Y PRODUCCIÓN NFU'S EN ESPAÑA. _____	60
TABLA 5. SITUACIÓN DEL MERCADO DE NFU'S APROXIMADA EN ESPAÑA. _____	60
TABLA 6. CLASIFICACIÓN DE LOS NFU'S POR TAMAÑO Y DIMENSIONES _____	63
TABLA 7. COMPOSICIÓN MEDIA DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE NEUMÁTICOS (%). FUENTE: [77, P. 18], [97]. _____	65
TABLA 8. PRINCIPALES COMPONENTES DE LOS NFU'S. FUENTE: [98]. _____	65
TABLA 9. PROGRAMAS EN MATERIA DE RESIDUOS PARA NFU'S POR COMUNIDADES. _____	78
TABLA 10. NORMAS RELATIVAS A LA GESTIÓN Y CONTROL DE CALIDAD DE LOS NFU'S. _____	80
TABLA 11. MATERIALES NO CONVENCIONALES Y RESIDUOS DE POSIBLE UTILIZACIÓN EN TERRAPLENES DE CARRETERAS. ____	82
TABLA 12. PROPIEDADES Y OBSERVACIONES DE LOS MATERIALES MARGINALES TIPO RESIDUOS. _____	83
TABLA 13. EMPLEO DE MATERIALES MARGINALES EN LAS ZONAS DEL TERRAPLÉN. FUENTE: [99, P. 09]. _____	85
TABLA 14. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SEGÚN EL PG-3(2002) PARA LOS TIPOS DE SUELOS. FUENTE: [99, P. 07]. ____	85
TABLA 15. OBSERVACIONES EN RELACIÓN A LA PUESTA EN OBRA EN MATERIALES MARGINALES. FUENTE: [99, P. 09]. ____	86
TABLA 16. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA. FUENTE: [121]. _____	88
TABLA 17. APLICACIONES DE LOS ÁRIDOS NATURALES. FUENTE: [40, P. 453] _____	90
TABLA 18. RECOMENDACIONES PARA ÁRIDOS RECICLADOS EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES. FUENTE: [45]. _____	97
TABLA 19. MATERIAL GRANULAR DE NFU'S EVALUADO EN LA FASE EXPERIMENTAL. _____	105
TABLA 20. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE LOS GRANULADOS DE NFU'S. _____	107
TABLA 21 MÉTODOS DE ENSAYO, MUESTRAS Y CONDICIONES DEL GRANULADO DE NFU'S EN LA FASE EXPERIMENTAL. ____	109
TABLA 22. DIMENSIONES DE LOS NFU'S POR TAMAÑO Y DESIGNACIÓN _____	111
TABLA 23. TAMAÑOS DEL GRANO ( $D_{10}$ , $D_{30}$ , $D_{60}$ ), COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD ( $C_u$ ) Y DE CURVATURA ( $C_c$ ) DE LOS NFU'S. _____	113
TABLA 24. RESULTADO DE DENSIDAD PARTÍCULAS ( $P_A$ ); SECADAS EN ESTUFA ( $P_{RD}$ ); SATURADAS Y SECADAS SUPERFICIALMENTE ( $P_{SSD}$ ); ABSORCIÓN DE AGUA ( $W_{A24}$ ) DE LOS GRANULADOS NFU'S. _____	116
TABLA 25. RESULTADO DE DENSIDAD APARENTE DE LA MUESTRA ( $P_B$ ); PARTÍCULAS ( $P_A$ ); PORCENTAJE DE HUECOS (N) DE LOS GRANULADOS NFU'S. _____	118
TABLA 26. RESULTADOS PREVIOS DE LA COHESIÓN Y DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE LAS COMBINACIONES DE GRANULADO DE NFU'S. _____	124
TABLA 27. VALORES RESULTANTES DE LA COHESIÓN Y DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN DE LAS COMBINACIONES DE GRANULADO DE NFU'S. _____	127
TABLA 28. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE COMPRESIBILIDAD DE LAS MUESTRAS $S_5$ Y $S_6$ DEL GRANULADO DE NFU'S. ENSAYO EDOMÉTRICO. _____	136
TABLA 29. RESULTADOS DE PERMEABILIDAD $K$ (M/S) DE LAS COMBINACIONES DE GRANULADO DE NFU'S. _____	139
TABLA 30. EXPERIENCIA DE MATERIALES RECICLADOS EN TERRAPLENES. _____	146
TABLA 31. CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DEL GRANULADO DE NFU'S, MATERIAL PROPUESTO EN LA REPARACIÓN DEL VIAL DE ACCESO DE LA URBANIZACIÓN CÁRMENES DEL MAR, ALMUÑECAR. _____	151
TABLA 32. PESO UNITARIO Y COSTO DE VARIOS MATERIALES DE RELLENO LIVIANOS. FUENTE:[195] _____	155

TABLA 33. CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DEL GRANULADO DE NFU'S, PROPUESTO EN LAS OBRAS DE REHABILITACIÓN DEL CASTILLO DE UTRERA, SEVILLA. _____	159
TABLA 34. PROPUESTA DE MATERIAL FILTRANTE, MUESTRAS DE GRANULADO DE NFU'S. _____	160
TABLA 35. PROPUESTA DE MATERIAL DE RELLENO, DE LOS ESTUDIOS GEOTÉCNICOS DE REFERENCIA. _____	161
TABLA 36. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE MATERIAL FILTRANTE DE LAS MUESTRAS DE GRANULADO DE NFU'S (F <sub>15</sub> ; F <sub>50</sub> ) Y DIFERENTES TIPOS DE SUELOS DE ACUERDO CON LAS CONDICIONES DE COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DEL PG-3. _____	161
TABLA 37. COMPENDIO DE ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO DE LOS NFU'S Y MATERIALES CONVENCIONALES. _____	167
TABLA 38. RESUMEN DE VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA BASE DE DATOS BIBLIOGRÁFICO DE LOS NFU'S. _____	169
TABLA 39. RESUMEN DE VALORES CARACTERÍSTICOS DEL ENSAYO PRÓCTOR DE DENSIDAD SECA MÁXIMA P <sub>d</sub> (kN/M <sup>3</sup> ) DE LOS GRANULADOS DE NFU'S. _____	170
TABLA 40. RESUMEN DE VALORES CARACTERÍSTICOS DEL ENSAYO DE CIZALLAMIENTO DIRECTO DE LOS GRANULADOS DE NFU'S: COHESIÓN (kPa) Y ÁNGULO DE ROZAMIENTO (°). _____	171
TABLA 41. FACTORES DE EQUIVALENCIA PARA LOS VALORES CARACTERÍSTICOS DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NFU'S _____	174
TABLA 42. VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA BASE DE DATOS BIBLIOGRÁFICO DE LOS DE NFU'S. _____	219
TABLA 43. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL ENSAYO PRÓCTOR DE DENSIDAD SECA MÁXIMA P <sub>d</sub> (kN/M <sup>3</sup> ) DE LOS GRANULADOS DE NFU'S. _____	220
TABLA 44. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL ENSAYO DE CIZALLAMIENTO DIRECTO DE LOS GRANULADOS DE NFU'S: COHESIÓN (kPa). _____	221
TABLA 45. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL ENSAYO DE CIZALLAMIENTO DIRECTO DE LOS GRANULADOS DE NFU'S: ÁNGULO DE ROZAMIENTO (°). _____	221

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. CONDICIONES HIDRÁULICAS. ENSAYO DE PERMEABILIDAD. FUENTE: [80]. .....	137
ECUACIÓN 2 COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE MATERIAL FILTRANTE, PG-3 PARTE 4, DRENAJES. FUENTE : [125].....	160

## SÍMBOLOS Y DEFINICIONES

<b>A</b>	Área
$m_0$	masa inicial de la probeta de ensayo
$m_d$	masa final seca de la probeta de ensayo
$e$	índice de huecos
$e_0$	índice de huecos inicial
$S_r$	grado de saturación inicial
$\rho_w$	densidad del agua
$\rho_b$	densidad aparente de la muestra
$\rho_a$	densidad aparente de partículas
$\rho_{rd}$	densidad de partículas secadas en estufa
$\rho_{ssd}$	densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente
$W_{A24}$	absorción de agua después de la inmersión durante 24 h
$\gamma$	peso unitario seco
$\Delta_H$	cambio de altura de la probeta de ensayo desde la lectura cero inicial
$\tau$	tensión tangencial en la superficie de rotura
$\tau_R$	resistencia al corte residual
$\sigma_v$	tensión vertical en la superficie de rotura
$P$	fuerza de corte horizontal
$N$	fuerza vertical
$c$	cohesión
$c'$	cohesión efectiva
$\Phi$	ángulo de rozamiento
$\varphi'$	ángulo de rozamiento efectivo
$\varphi'_R$	ángulo de rozamiento efectivo residual
$M_t$	momento (par torsor) aplicado a la probeta de ensayo en el corte anular
$C_c$	coeficiente de Curvatura de la granulometría de un suelo
$C_c$	Índice de compresión de un suelo. Ensayo de consolidación unidimensional
$C_s$	Índice de hinchamiento de un suelo. Ensayo de consolidación unidimensional
$C_u$	coeficiente de Uniformidad de la granulometría de un suelo
$D_{10}$	diámetro de partícula correspondiente a un 10 % más fino
$D_{30}$	diámetro de partícula correspondiente a un 30% más fino
$D_{50}$	diámetro de partícula correspondiente a un 50 % más fino
$D_{60}$	diámetro de partícula correspondiente a un 60% más fino
$E$	Módulo Young
$E_{v1}$	Módulo de compresibilidad estática obtenido de la primera rama de carga de un ensayo de placa de carga estática
$E_{v2}$	Módulo de compresibilidad estática obtenido de la segunda rama de carga de un ensayo de placa de carga estática
$E_{vd}$	Módulo de compresibilidad dinámico obtenido del ensayo de placa de carga dinámica (LFD)
$G_{max}$	Módulo de rigidez máximo o módulo de esfuerzo cortante máximo
$G_s$	Densidad relativa de las partículas de un suelo
$H_L$	Hinchamiento libre de un suelo en edómetro
$K$	Coefficiente de permeabilidad, método de carga variable
$k_1, k_2$	Parámetros no lineales, que dependerá del material estudiado según el modelo no lineal "Bulk Stress Model" (Modelo de Tensiones Principales)
$m$	Metro
$mm$	Milímetro
$mg$	Miligramo
$mPa$	Mega pascal
$N$	newton
$M_r$	Módulo de resiliencia
$\omega$	Humedad natural de un suelo
$\omega_{opt}$	Humedad natural de un suelo óptimo
<b>AASHTO</b>	Sociedad Americana de Autovías Estatales y Transporte. ("American Association of State Highway and Transportation Officials")

ASTM	<i>Sociedad Americana de Ensayo de Materiales ("American Society for Testing and Materials")</i>
CEDEX	<i>Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (España)</i>
IP	<i>Índice Plasticidad de un suelo</i>
NFU	<i>Neumáticos fuera de uso</i>
UNE	<i>Normas de Ensayo Españolas (Una Norma Española)</i>
SUCS	<i>Clasificación de Suelos Unificada de Casagrande ("Unified Soil Classification System" USCS)</i>
COV	<i>Coefficiente de variación de las variables características.</i>
CEN	<i>Comisión Europea de Normalización (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION)</i>
CWA	<i>Acuerdo de taller del CEN (CEN WORKSHOP AGREEMENT)</i>
ELT's	<i>End-of-Life Tires - Neumáticos fuera de uso</i>

## RESUMEN

La siguiente investigación presenta un protocolo basado en la caracterización de un rango detallado de tamaños de partículas ( $\leq 12\text{mm}$ ) de NFU's y sus posibles usos en aplicaciones geotécnicas. Este enfoque pretende aportar una solución al problema del exceso de almacenamiento de esta granulometría en las plantas de tratamiento. Con ello se pretende contribuir a las iniciativas encaminadas a favorecer la incursión de materiales reciclados en la sostenibilidad del sector de la construcción.

Este trabajo presenta los resultados del estudio experimental para la caracterización de las principales propiedades del granulado de NFU's. Se han preparado varias muestras en el laboratorio y se han realizado diversos ensayos para cuantificar sus propiedades geotécnicas. En primer lugar, se ilustran y discuten los ensayos realizados. En segundo lugar, se han obtenido los valores característicos de las combinaciones propuestas mediante métodos estadísticos, realizando así un modelo de comportamiento a partir de sus parámetros geotécnicos. Finalmente, se discute su implementación en dos casos prácticos: utilizando el granulado de NFU's como capa de terraplén para transmitir cargas en zona con problemas de deslizamientos, y su uso como relleno ligero en la parte posterior de un muro de contención en voladizo.

La novedad que plantea esta investigación, se centra en el análisis específico de una serie de granulometrías y mezclas de las mismas, de material no cohesivo, para caracterizar en laboratorio, obteniendo así parámetros geotécnicos a partir de los valores característicos, llevando a cabo correlaciones de los datos obtenidos en el laboratorio a aplicaciones en campo, de acuerdo con las especificaciones del Código Técnico Español (CTE-DB-SE-C) y del Eurocódigo (EC7-1).

Palabras claves: valores característicos de los granulados de NFU's, influencia del tamaño de partícula, correlación entre propiedades y las aplicaciones geotécnicas de los NFU's.

## **ABSTRACT**

The following research presents a protocol based on the characterisation of a detailed range of particle sizes ( $\leq 12\text{mm}$ ) of NFU's and their possible uses in geotechnical applications. This approach aims to provide a solution to the problem of excess storage of this particle size in treatment plants. The aim is to contribute to initiatives aimed at promoting the use of recycled materials in the sustainability of the construction sector.

This work presents the results of the experimental study for the characterisation of the main properties of NFU granules. Several samples have been prepared in the laboratory and several tests have been carried out to quantify their geotechnical properties. Firstly, the tests carried out are illustrated and discussed. Secondly, the characteristic values of the proposed combinations have been obtained by means of statistical methods, thus making a behavioural model from their geotechnical parameters. Finally, their implementation is discussed in two practical cases: using the NFU granules as an embankment layer to transmit loads in an area with landslide problems, and their use as a light backfill in the rear of a cantilevered retaining wall.

The novelty of this research focuses on the specific analysis of a series of granulometries and mixtures of non-cohesive material, to be characterised in the laboratory, thus obtaining geotechnical parameters from the characteristic values, carrying out correlations of the data obtained in the laboratory to field applications, in accordance with the specifications of the Spanish Technical Code (CTE-DB-SE-C) and the Eurocode (EC7-1).

Keywords: characteristic values of NFU granulates, influence of particle size, correlation between properties and geotechnical applications of NFU.



## **1. INTRODUCCIÓN: UNA APROXIMACIÓN A LOS MATERIALES RECICLADOS**

### *1.1 Introducción*

El sector de los áridos es la materia prima más consumida por el hombre, después del agua [1] y es el principal suministrador de materias primas para la construcción de infraestructuras, la edificación, la industria y la protección del medio ambiente, lo que le confiere el carácter de industria estratégica.

Se puede afirmar que los principales efectos que surgen de la implementación de materiales en la construcción sobre el medio ambiente son los siguientes [2]:

- Consumo de recursos naturales.
- Consumo energético.
- Producción de residuos sólidos.
- Incidencia en el efecto invernadero.
- Incidencia en la capa de ozono.
- Otros factores de contaminación ambiental.

El consumo de recursos naturales y de energía ha aumentado proporcionalmente al crecimiento de la población mundial y su nivel económico. De ello resulta un consumo exponencialmente creciente del recurso y un deterioro ambiental. En el escenario actual, la gestión de algunos residuos procedentes de diversas industrias es un grave problema. Estos residuos actúan como focos de infección ambiental, ya que en su mayoría no son biodegradables, como en el caso de los NFU's. La generación de grandes volúmenes de triturados de NFU's indica el grave problema de acumulación del material, así como la importancia de desarrollar nuevas aplicaciones y mercados para este residuo industrial.

Partiendo de que la explotación de los bancos de materiales de áridos convencionales se ha convertido en un sistema insostenible y que el modelo de sociedad está consumiendo los recursos naturales a un ritmo más acelerado que la tasa de renovación de la naturaleza, la incorporación de criterios ambientales, sociales y económicos es una evidente necesidad para avanzar hacia un modelo de desarrollo sostenible. Promover la adopción de criterios de sostenibilidad y facilitar su valorización contribuye a las

iniciativas encaminadas a favorecer la incursión de materiales reciclados en la sostenibilidad del sector de la construcción.

Muchos tipos de residuos industriales están disponibles en grandes cantidades; que se utilicen o no depende, por lo general, de la falta de una metodología y normas de ensayos adecuadas que garanticen un buen rendimiento. Además, hay poca experiencia y difusión de sus posibles aplicaciones y también faltan medios financieros, equipos técnicos, tiempo para desarrollar trabajos de investigación, formación adecuada y legislación.

Entre los residuos que han sido objeto de un mayor número de estudios y con mayor número de experiencias prácticas en España como materiales aprovechables en la construcción, se tienen los Residuos de Demolición y Construcción (RCD's) y los Neumáticos fuera de uso (NFU's).

Un buen número de investigaciones se encuentran actualmente desarrollando nuevas líneas de implementación de materiales reciclados de NFU's. Con ello se pretende eliminar su condición de residuo y aumentar su valor de mercado y la utilidad de este material. Esto proporcionará una solución al problema actual del excedente de este residuo en las plantas de tratamiento.

Los granulados de NFU's poseen propiedades técnicas atractivas y podrían ser utilizados de forma beneficiosa en aplicaciones de ingeniería civil. En general, las investigaciones referentes a la implementación de NFU's en obras de geotecnia se han centrado en el estudio de tamaños de triturado entre 76 mm y 305 mm, y de virutas que suelen oscilar entre 12 mm y 76 mm. En este sentido, la presente investigación pretende generar una base de datos de las características que guardan los granulados de NFU's a partir de sus parámetros geotécnicos de una gama detallada de tamaños de partículas inferiores a 12 mm.

## *1.2. Aspectos generales de los áridos*

Las propiedades o características de los materiales de la construcción son muchas y muy variadas. Las clasificaciones como las que agrupan propiedades físicas o químicas son

obvias, pero no son las más apropiadas para estudiar dichos materiales, y mucho menos los materiales reciclados, ya que no se toma en cuenta el estado de la materia (sólidos granulares, sólidos compactos, líquidos, fluidos, pasta, etc.). Por ejemplo: la carbonatación es tanto un proceso químico como un aspecto más de la durabilidad de un material como el hormigón. [3].

Aunado a ello, cuando se analizan las propiedades de un material reciclado, existen factores que afectan más o menos a sus características. En este sentido, aparecen diferentes autores que aportan clasificaciones más precisas para su estudio [3], [4], como la que a continuación se detalla:

#### PROPIEDADES FÍSICAS

- Propiedades habituales de los materiales: Masa, peso y densidad, homogeneidad, isotropía.
- Propiedades de los fluidos: Presión, tensión superficial, viscosidad, tixotropía.
- Propiedades de las pastas: Consistencia (fluidéz).
- Propiedades comunes a los sólidos granulares: Porosidad y compacidad, capilaridad, cohesión, finura, ángulo de rozamiento interno, ángulo de talud natural.
- Propiedades comunes a todos los sólidos de la materia: Porosidad, capilaridad, eflorescencia, absorción, adsorción, permeabilidad, difusibilidad, pulidez, rugosidad, brillo, color, transparencia, translucidez, opacidad.
- Mecánicas: Resistencia a la rotura, tenacidad (tracción, compresión, flexión, etc.), resiliencia, dureza, deformabilidad, elasticidad, plasticidad, fragilidad, rigidez, ductilidad, maleabilidad.
- Reológicas: Dilatación térmica, entumecimiento, retracción, intumescencia.
- Térmicas: Conductividad, calor específico, fusión, soldabilidad.
- Ondas de Luz, radiación, sonido: Absorción, reflexión, transmisión, refracción, emisividad.

#### PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS

- Resistencia a los productos químicos.

- Resistencia al fuego: Combustibilidad, inflamabilidad, tratamiento ignífugo, autoextinguibilidad.
- Durabilidad: Putrefacción, resistencia a los insectos, heladicidad, resistencia a los rayos ultravioleta, oxidación, corrosión y carbonatación.

#### OTRAS PROPIEDADES

- Costos: Ambientales, energéticos, monetarios (precio extracción de las materias primas, elaboración, montaje, colocación, mantenimiento, derribos y transporte, etc.)
- Toxicidad: Directa, sublimación, combustión.
- Reciclaje: Sostenibilidad.

De manera general se puede señalar que las propiedades de los áridos naturales que tienen mayor interés son las físicas [3]:

- La resistencia a compresión, la resistencia a la abrasión y el módulo de elasticidad, función en buena medida de su porosidad.
- La forma, el tamaño y la fracción volumétrica (gran influencia en la trabajabilidad del hormigón fresco y en la resistencia del hormigón endurecido).
- La textura superficial (influye en la unión del árido y el aglomerado).

Los materiales granulares son compuestos de partículas de diámetros, que aglomerados o no, forman una masa que fácilmente tiende a ocupar el volumen que la contiene [3]. En construcción, estos tipos de materiales se encuentran en cuatro fases muy caracterizadas [5]:

- Como elemento que sirve para formar otros compuestos: mortero, hormigón.
- Como elemento que se utiliza como tal, es decir, en forma granular: arcilla expandida, gravas, arena (terraplenes), etc.
- Como elemento que, sin utilizarse directamente, hace de soporte y ejerce presión sobre las edificaciones: el terreno natural.
- Como elemento configurador de zonas exteriores no pavimentadas: taludes, ajardinamientos.

Por mencionar algunas cifras del panorama que guardan los áridos en la UE, de acuerdo con European Aggregates Association [6] en 2015 la producción de áridos fue de 2.660

millones de toneladas (bnt). En las ilustraciones 1 y 2 se muestra la producción de áridos de cada país perteneciente a la UE en 2015.

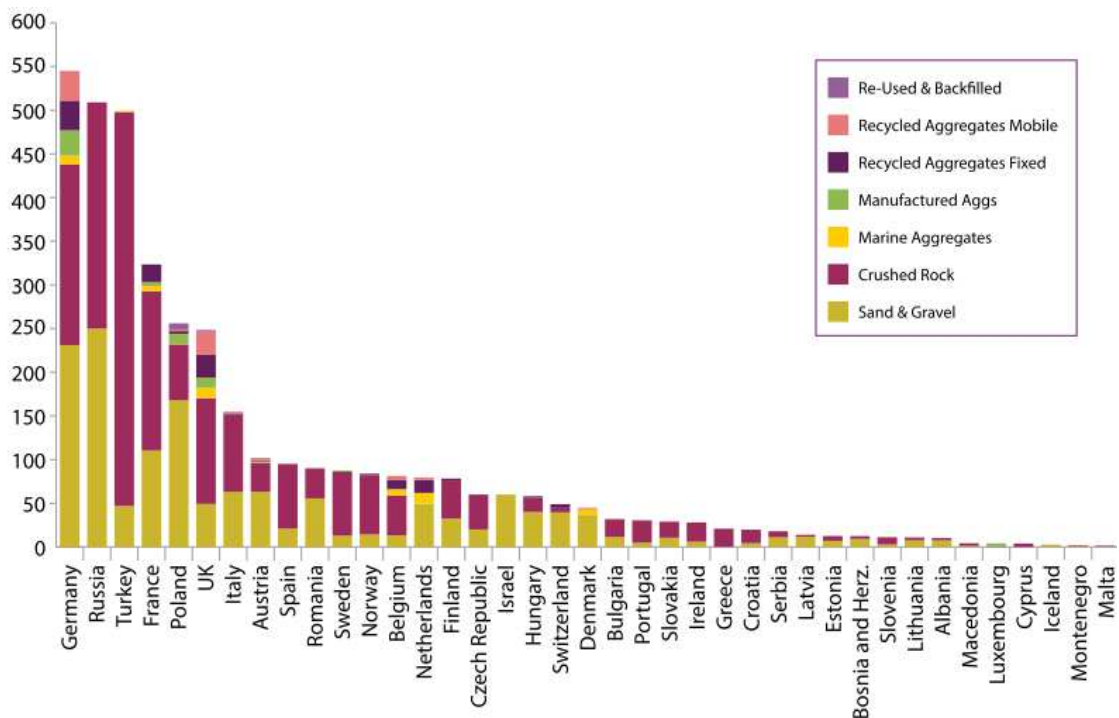


Ilustración 1 Producción de áridos (millones de toneladas por País) 2015. Fuente: [6]

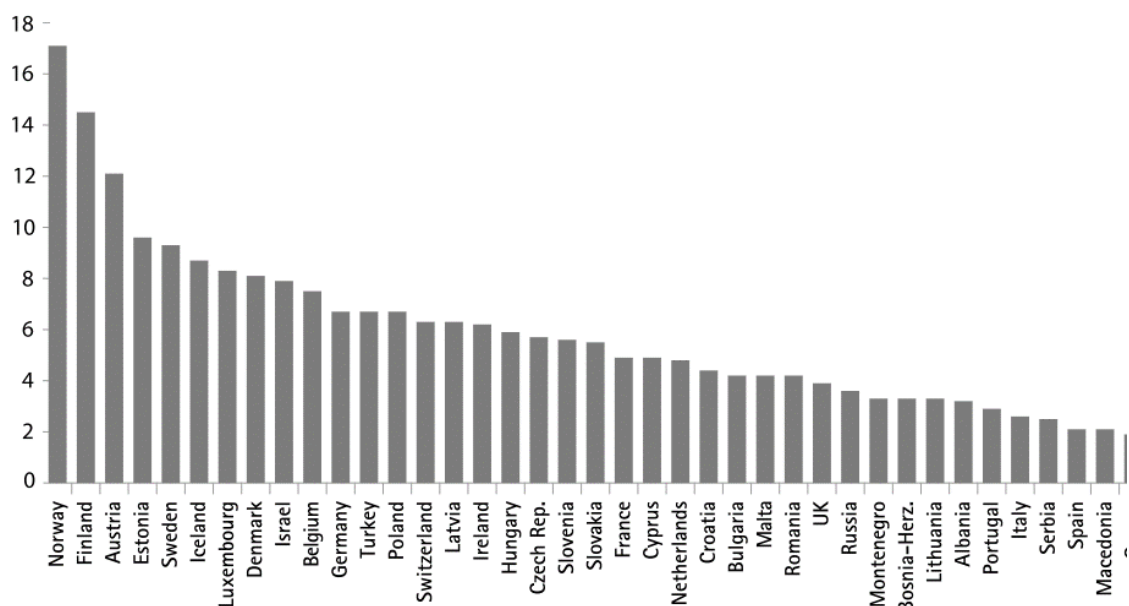


Ilustración 2 Producción de áridos per cápita (millones de toneladas por País) 2015. Fuente: [6]

Según la plataforma de Eurostat [7], en 2019 se utilizaron en Europa 6.917 millones de toneladas de materiales (14,22 toneladas per cápita), de los cuales, la construcción consume gran parte. El consumo total de áridos naturales para la construcción ha sido de 136,5 millones de toneladas en 2019 [8], un 13% más que en 2016, donde se consumieron unos 120,6 millones de toneladas [9]. El informe de ANEFA (2019) [8] señala que en 2019 se utilizaron 2,5 millones de toneladas de áridos reciclados y 1 millón de toneladas de áridos artificiales.

### 1.3. *Análisis del ciclo de vida de los áridos reciclados*

El término "Análisis del Ciclo de Vida" (ACV) comenzó a utilizarse en la década de 1970, e identifica, cuantifica y caracteriza los diferentes impactos ambientales basándose en un inventario de flujos de entrantes y salientes del sistema, calculando así los requerimientos energéticos, de materiales y las emisiones producidas [10].

Existen diferentes indicadores medioambientales en el sector de la construcción. Uno de los más utilizados es la medición de la huella ecológica (HE), que produce resultados entendibles por la sociedad no científica, y su facilidad de aplicación permite incluirla en políticas medioambientales y en la toma de decisiones [11]. El concepto moderno de HE fue presentado formalmente por Mathis Wackernagel y William Rees a principios de la década de 1990 [12]. Se establece como "la extensión de tierra que sería necesaria para suministrar los recursos (cereales, pienso, leña, pescado y terreno urbano) y absorber las emisiones (CO<sub>2</sub>) de la sociedad mundial" [12].

Desde un ámbito muy general, se podría tomar en cuenta el impacto ambiental de los materiales de construcción para la selección de los mismos. Los métodos de ACV pretenden analizar el impacto que ocasiona cualquier material evaluado en cada una de las fases de su vida. Se establecen comparativas del impacto ocasionado (por ejemplo, las emisiones de gases invernadero se traducen en cantidades equivalentes de CO<sub>2</sub>), y a continuación se realiza la comparación con el material de similitud, facilitando la toma de decisiones.

El ciclo de vida de un árido natural se encuentra ligado al ciclo de vida de las edificaciones [13]. De esta manera, se puede realizar un análisis del ciclo de vida útil del árido relacionado con una edificación (Ilustración 3). Siguiendo el esquema antes referido, se pueden analizar los siguientes impactos: efecto invernadero, ozono, acidificación del suelo, eutrofización del agua, contaminación atmosférica, contaminación del suelo y el agua por metales pesados y pesticidas, consumo de energía y producción de residuos sólidos [14].

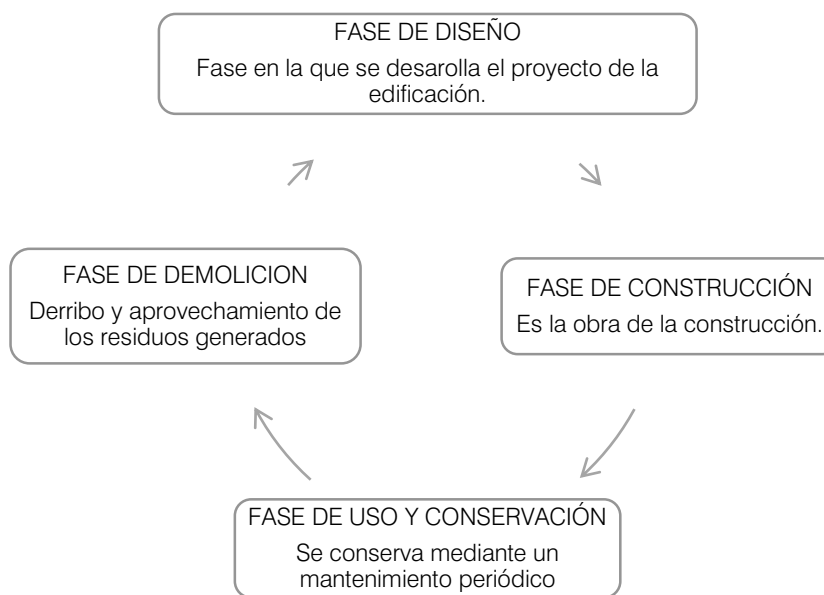


Ilustración 3. Esquema general del ciclo de vida de una edificación. Fuente: [13]

A continuación se enlista el impacto ambiental de los principales materiales de construcción (Ilustración 4):

Material	Efecto invernadero	Acidificación	Contaminación atmosférica	Ozono	Metales pesados	Energía	Residuos sólidos
Cerámica	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+
Piedra	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+
Acero	++	++	+	+++	++	++	+++
Aluminio	+	+	++	+++	+	+	+++
PVC	++	++	+	+++	++	++	++
Poliestireno	++	+	+	++	+	+	++
Poliuretano	+	++	+	+	++	++	+++
Pino	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++

+++ impacto pequeño; ++ impacto medio; + impacto elevado.

Ilustración 4. Impacto ambiental de los principales materiales de construcción según el Programa Simapro de Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: [15].

Cuando se analiza el comportamiento de los materiales, es importante reconocer las diferentes fases que lo configuran [14]:

- En la fase de **extracción** de los materiales habrá que considerar la transformación del medio.
- En la fase de **producción** (plásticos y metales), las emisiones que se generan y el consumo de energía.
- En la fase de **transporte**, el consumo de energía, que será más elevado si provienen de lugares más lejanos.
- En la puesta en **obra**, los riesgos sobre la salud humana y la generación de sobrantes.
- En la **demolición**, las emisiones contaminantes y la transformación del medio.

Los métodos de análisis de ciclo de vida evalúan el impacto que ocasionan los materiales en cada una de las fases de su vida. El análisis de las fases anteriores en todo el ciclo de vida del material nos puede determinar una serie de pautas a seguir para seleccionar los materiales más sostenibles. Son los materiales que [11, pp. 56–57]:

- Procedan de fuentes renovables y abundantes.
- No contaminen.
- Consuman poca energía en su ciclo de vida.
- Sean duraderos.
- Puedan estandarizarse.
- Sean fácilmente valorizables.
- Procedan de una producción justa.
- Tengan valor cultural en su entorno.
- Tengan bajo coste económico.

#### 1.4. *Impactos de la edificación: materiales y residuos*

A lo largo de la historia, se ha producido un cambio en el proceso de obtención de los materiales. Hasta no hace mucho, la obtención se realizaba en el entorno más próximo, cerca de la implementación, a partir de la centralización de las ciudades y la aparición de



medios de extracción y fabricación más eficientes y potentes, así como un transporte mucho más globalizado [14], hace que la producción de materiales pierda la inmediatez de lo cercano y se convierta en una actividad altamente impactante.

#### 1.4.1. Sostenibilidad en la construcción

La incorporación de criterios ambientales, sociales y económicos es una evidente necesidad para avanzar hacia un modelo de desarrollo sostenible. El término "desarrollo sostenible" aparece por primera vez en el informe "Nuestro Futuro Común", también conocido como Informe Brundtland de la Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo (1987) sobre el futuro del planeta y la relación entre medio ambiente y desarrollo. Dicho término se entiende por:

"AQUEL QUE SATISFACE LAS NECESIDADES PRESENTES SIN PONER EN PELIGRO LA CAPACIDAD DE LAS GENERACIONES FUTURAS PARA SATISFACER SUS PROPIAS NECESIDADES" [16].

Actualmente existen diferentes interpretaciones del concepto de desarrollo sostenible y coinciden en que, para lograrlo, las medidas a considerar deberán ser económicamente viables, respetar el medio ambiente y ser socialmente equitativas [10]. Se entiende por sostenibilidad todo aquello que es susceptible de ser sostenido, es decir, a ser mantenido, constante, uniforme, consecutivo, perpetuo [17]. El problema se plantea cuando el uso de un vocabulario común no contribuye a avanzar en políticas realmente sostenibles.

Es evidente la incompatibilidad que existe entre el crecimiento económico y el equilibrio ecológico en los sistemas tradicionales actuales. La relación entre el medio ambiente y la economía se definió de forma explícita en 1992, cuando se consideró que el crecimiento económico es insostenible [18].

Actualmente no existe consenso acerca del significado de desarrollo sostenible (existen más de cien definiciones), ya que tampoco lo hay acerca de qué es lo que debe sostenerse.

La sostenibilidad en términos ecológicos supone que la economía sea circular, que siempre haya una continuidad para que sea un ciclo cerrado de vida, donde todo se evalúe de manera circular. Para ello han surgido varias iniciativas de la UE con el objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Tras haber logrado sus objetivos en virtud del Protocolo de Kioto para el período 2008-2012, la UE adoptó un objetivo de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero para 2020 cifrado en un 20% por debajo de los niveles de 1990 [16] y en un 40% para el 2030, al menos un 32% de cuota de energías renovables y al menos un 32,5% de mejora de la eficiencia energética [19], aunque existen muchos contrastes entre los objetivos planteados y las cifras reales.

El concepto de construcción sostenible supone una disminución de la cantidad de materiales necesarios y evitar, siempre y cuando sea posible, la utilización de aquellos que, al final de su ciclo de vida, originen residuos peligrosos [11, pp. 55–57]. Tras el periodo de crecimiento económico y el inicio de la recesión en el sector de la construcción, se han marcado directrices para reducir el impacto ambiental que generan los RCD's, así como la importancia de la eficiencia energética y la gestión de recursos naturales [11, p. 21]. Es por ello que se han creado estrategias para reducir el impacto ambiental y consumo energético, potenciando el uso de [11]:

- Recursos naturales y renovables.
- Desecho de otras industrias.
- Materiales y componentes más ligeros.

Muchos de los estudios han puesto de manifiesto la importancia de realizar recomendaciones sobre la implementación de materiales reciclados, siempre desde el punto de vista de la sostenibilidad, productividad y economía. El uso de este tipo de materiales reciclados y de desecho en la industria de la construcción da como resultado la reducción de la contaminación ambiental, ya que la emisión de CO<sub>2</sub> es casi nula [20].

#### 1.4.2. Consideraciones medioambientales en los áridos reciclados

En general, puede decirse que los países del sur de Europa tienden a reciclar relativamente poco, debido a la abundante oferta existente de áridos naturales de calidad adecuada a precios bajos [21], [22]. La extracción de minerales tiene graves

consecuencias para el medio ambiente, como cambios en la morfología del terreno, en las aguas superficiales y en la contaminación del aire, la contaminación de las aguas subterráneas y afectaciones para la flora y la fauna [23]. Por otro lado, se ha demostrado que la sustitución de los materiales convencionales por materiales reciclados permite reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. En proyectos de gran envergadura, las reducciones pueden alcanzar más del 50%, obteniendo beneficios medioambientales [24].

De acuerdo con los datos obtenidos por la plataforma Tecnológica Española de la Construcción (PTEC), en Europa el 40% de la energía se consume en edificación para el calentamiento, enfriamiento e iluminación. También se destaca que alrededor del 40% de los recursos materiales se consumen en el sector de la construcción, generando el 40% del total de los residuos y produciendo el 35% de las emisiones de gases de efecto invernadero [14], [25]. En 2012, la industria del hormigón empleó 1.6 billones de toneladas de cemento, 10 billones de toneladas de roca y arena y un billón de toneladas de agua. Cada tonelada de cemento requiere 1.5 toneladas de roca caliza, así como del consumo de combustibles fósiles [26]. Estos datos nos indican un sector que tiene diversas consecuencias sobre el medio económico, ecológico y social, en definitiva un sector insostenible.

Emplear materiales de bajo consumo energético se presenta como uno de los indicadores de sostenibilidad. Borsani (2012) [1] señala que la elección responsable de materiales se basa en criterios de uso sostenibles, que son aquellos que reducen al mínimo el uso de recursos, tienen un bajo impacto ecológico, representan un riesgo bajo para la salud humana y el medio ambiente, y son compatibles con estrategias sostenibles.

## 2. PLANTEAMIENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. *Hipótesis y preguntas de partida*

Se plantean las siguientes preguntas de investigación: ¿Se pueden utilizar residuos industriales en sustitución de áridos convencionales en obras de geotecnia? ¿Qué características presentan los granulados de NFU's (neumáticos fuera de uso)? ¿Cuál es la influencia del tamaño de la partícula en los parámetros geotécnicos? ¿Qué importancia tiene hacer combinaciones de granulometrías en los parámetros geotécnicos? ¿Cuál es el rango de valores característicos de los granulados de NFU's? ¿Qué propiedades podrían beneficiar la implementación en el ámbito de la construcción? ¿En qué aplicaciones se podría implementar?

De acuerdo con la directiva Europea 1999/31/CE que prohíbe la eliminación por depósito en vertederos de neumáticos enteros a partir del 2003 y de los troceados a partir del 2006, así como su correspondiente legislación a nivel nacional, reflejada en el Real Decreto 1481/2001 de 27 de diciembre, se hace necesaria la búsqueda de nuevas posibilidades de reciclaje del NFU's.

Partiendo de que la explotación de los bancos de materiales de áridos convencionales ha llegado a ser un sistema insostenible y que el modelo de sociedad está consumiendo los recursos naturales a un ritmo más acelerado que la tasa de renovación de la naturaleza, se hace necesario la búsqueda de nuevos materiales que suplan los requerimientos de recursos naturales. Por ello se plantea la descripción y evaluación de las características de los granulados de NFU's como posible sustituto de materiales de construcción.

Los granulados de NFU's poseen propiedades técnicas atractivas, que podrían ser utilizados de forma beneficiosa en aplicaciones de ingeniería civil. Algunas propiedades de los granulados de NFU's son: baja densidad, bajo peso unitario, alta elasticidad, alta amortiguación, baja rigidez, alta capacidad de drenaje y resistencia a la degradación. Estas propiedades generan un abanico de posibilidades para ser utilizados en sustitución de áridos convencionales. Se parte de la idea de que sustituir porcentajes de mezclas en

suelos o la totalidad del granulado de NFU's tiene efectos positivos en el comportamiento de las muestras.

## 2.1. *Objetivos*

Para resolver todas las preguntas planteadas, se proponen los siguientes objetivos:

### 2.1.1. *Objetivo principal*

Se plantea en esta tesis de investigación doctoral estudiar la viabilidad de materiales reciclados, en específico el uso del granulado de NFU's como material no unido y sus aplicaciones en ingeniería geotécnica. Se plantea describir y evaluar los parámetros característicos de una gama detallada de tamaños de partículas inferiores a 12 mm, estableciendo un protocolo basado en la caracterización de las propiedades en laboratorio de diferentes combinaciones de tamaños de NFU's y su verificación mediante métodos de cálculo estadístico.

El objetivo de este estudio es, por lo tanto, determinar los parámetros geotécnicos a partir de valores característicos de los granulados de NFU's. Se busca eliminar su condición de residuo y aumentar el valor de mercado y la utilidad de este material. El uso de granulados de NFU's, especialmente en terraplenes de carreteras, tendrá un impacto positivo en el medio ambiente, ya que la ejecución de cualquier obra lineal requiere en muchos casos el empleo de gran cantidad de material. Se busca encontrar la relación entre las características que guarda el granulado de NFU's y su correcta aplicación, así como describir la influencia de los parámetros geotécnicos obtenidos en laboratorio en las propiedades funcionales del material para su correcta implementación.

### 2.1.2. *Objetivos específicos*

Para la consecución del objetivo principal, la investigación se centrará en los siguientes **objetivos específicos**:

\_ **Elección del marco de estudio: recopilación y procesamiento de datos.** De las 2 plantas de tratamiento de NFU's en Andalucía, se realizará la selección de la muestra a partir de la producción y en base a una recopilación de datos. El objetivo de la selección de

muestras es realizar mediciones y evaluaciones de un conjunto representativo, y la búsqueda de la validación de datos para determinar valores característicos de una muestra adecuada.

**\_Estudiar propiedades comunes a los sólidos granulares del NFU's:** Porosidad y compacidad, capilaridad, permeabilidad, cohesión, finura y ángulo de rozamiento interno, etc., para la obtención de parámetros geotécnicos a partir de los valores característicos de acuerdo al Eurocódigo 7, así como evaluar los parámetros con mayor dispersión y su influencia con el resto de las variables.

**\_ Realizar una campaña de ensayos que permita conocer el comportamiento dinámico del granulado,** cuyo parámetro es la recuperación elástica, con el objetivo de evaluar las recomendaciones de implementación.

- Analizar la compresibilidad con diferentes tamaños de NFU's.
- Estudiar el efecto de la compactación sobre el comportamiento del NFU's.
- Estudiar los módulos edométricos del material.

**\_Identificación de las características requeridas para los posibles usos de los NFU's,** atendiendo a criterios de viabilidad técnica y repercusión. Identificar el uso beneficioso y las limitaciones en las aplicaciones de partículas inferiores a 12 mm en los ámbitos de la construcción.

**\_ Experimentación en campo,** en la implementación en obra de granulados de NFU's como material de construcción se busca:

- Adquirir experiencia en el uso del material.
- Estudio de las características a partir de la funcionalidad desde una perspectiva reductora de cargas y de deformaciones transmitidas al terreno.
- Aprovechamiento de las propiedades de los granulados de NFU's: alta capacidad de drenaje y una alta capacidad de aislamiento térmico, para rellenos de trasdosado de muros.
- Aplicación de resultados de laboratorio en campo.

## 2.2. Viabilidad de la propuesta

“SE REQUIEREN 10 SIGLOS PARA QUE UN NEUMÁTICO SE DEGRADY Y DESAPAREZCA DE LA NATURALEZA” [27], [28]

### 2.2.1. Interés en el caso de estudio

La forma adecuada para lograr la inmersión de un material industrial reciclado en el ámbito de la construcción consiste en la revisión y análisis de aquellas normativas, compendios e instrucciones técnicas que respaldan de modo afirmativo el uso de materiales reciclados. Esto implica el estudio detallado de las características requeridas para su uso, además de realizar comprobaciones tanto en laboratorio como en campo de la correcta implementación.

La Directiva Marco de Residuos [29] constituye el principal instrumento normativo para cambiar el enfoque de la gestión de los residuos en Europa. Esta directiva centra como objetivo la prevención y el reciclado, y para ello establece una jerarquía (Ilustración 5).

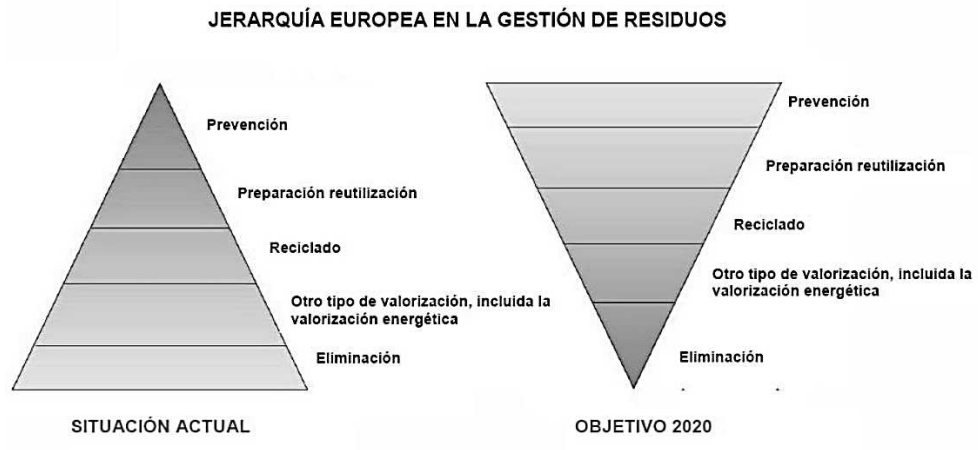


Ilustración 5. Jerarquía en Europea en la gestión de residuos. Fuente: [29]

Desde un punto de vista socioeconómico, el sector de la recogida y del tratamiento de residuos (valorización y eliminación) es un sector que aumenta consecutivamente y constituye una de las fuentes reconocidas de empleo verde. En definitiva estos cambios han surgido de las demandas de la sociedad, que percibe la generación de residuos como

una de las mayores preocupaciones ambientales y como un compromiso individual y colectivo.

El aprovechamiento de materiales industriales reciclados en el ámbito de la construcción, puede implicar las siguientes mejoras:

- Disminución de las actividades extractivas de bancos de materiales, debido a la sustitución de estos materiales pétreos por reciclados.
- Disminución de la entrada de residuos en los vertederos, alargando significativamente su vida útil.
- Posible obtención de ahorro en el transporte y materias primas.

El empleo de materiales reciclados en rehabilitación y obra nueva se ha convertido en un objetivo prioritario para la conservación de arquitectura e infraestructuras existentes, los cuales aportan el valor de la sostenibilidad, que aunque no pueda equipararse a parámetros económicos rentables, en la actualidad suponen una importante aportación en la reducción de CO<sub>2</sub> emitidos a la atmósfera y una respuesta a los compromisos derivados del Acuerdo de París 2030 de la Unión Europea sobre energía y clima, así como al Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) 2021-2030, los cuales se engloban dentro del RETO DE INVESTIGACIÓN "5. Cambio climático y utilización de recursos naturales y materias primas" [30].

Según la Federación Española de la Recuperación y el Reciclaje (FER), en la actualidad existen iniciativas para aprovechar todo el potencial que ofrece el sector de los NFU's. Señalan que aunque el caucho se recicla cada vez más con nuevas aplicaciones, una gran parte del mismo se emplea como combustible alternativo con fines energéticos.

Para optimizar la capacidad tecnológica de las plantas de recuperación y reciclado de NFU's, es necesario promover nuevos proyectos y concienciar a la sociedad de las opciones que ofrecen los NFU's, de forma que se consuman productos hechos con este material [31]. El uso de granulados de NFU's en aplicaciones de geotecnia, tendrá un impacto positivo en el medio ambiente, ya que la ejecución de cualquier obra lineal requiere en muchos casos el empleo de gran cantidad de material, pudiendo ofrecer una posibilidad beneficiosa.



Teniendo en cuenta que el 70% del neumático es caucho [32], se puede afirmar que en la Unión Europea se generan anualmente unos 4,7 millones de toneladas de granulados de caucho. La generación de grandes volúmenes de triturados de NFU's, refleja el grave problema de acumulación de material, y la importancia de desarrollar nuevas aplicaciones y nuevos mercados para este residuo industrial.

#### 2.2.2. Grado de relevancia e innovación

De acuerdo con el Plan Nacional de NFU's (PNNFU), la nueva legislación refuerza la jerarquía de residuos, exigiendo a los Estados miembros que adopten medidas necesarias para la reducción y la valorización energética por delante del depósito en vertedero y la incineración. De ello se espera un mayor uso de instrumentos económicos eficaces, con el fin de proporcionar incentivos para la aplicación de la jerarquía de residuos.

La presente investigación se enmarca en la línea asociada al ámbito de los Sistemas Integrados de Gestión de Neumáticos. De este modo, se pretende establecer un protocolo basado en la caracterización de los granulados de NFU's ( $\leq 12\text{mm}$ ), que hasta el momento ha sido poco estudiado, para el uso en aplicaciones geotécnicas, constituyendo así una línea de investigación que tiene una fuerte vinculación con la sostenibilidad económica y medioambiental.

De acuerdo con el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (en adelante PG-3) para la implementación de materiales marginales se deberán contemplar una serie de aspectos relacionados con las propiedades intrínsecas del material, así como la influencia de dichas características en los diferentes usos que se le asignen, además de una justificada validación del uso, con las correspondientes prescripciones técnicas a adoptar para los diferentes usos del material dentro de la obra.

En este sentido, la primera novedad que propone el proyecto, es la evaluación de los parámetros geotécnicos a partir de sus correspondientes valores característicos de los granulados de NFU's, llevando a cabo correlaciones de los datos obtenidos en el laboratorio a aplicaciones en campo, hasta el momento poco conocidas.

En segundo lugar se propone una nueva revalorización del granulado de caucho, en una aplicación que permite un mayor impacto por metro cúbico utilizado, a partir de un rango detallado de tamaños de partículas ( $\leq 12\text{mm}$ ). Esta línea de trabajo también permite dar nuevos usos al material granular de NFU's de pequeña granulometría, a través de un protocolo basado en la caracterización de las propiedades mecánicas en laboratorio de diferentes combinaciones de materiales, y su verificación mediante métodos de cálculo estadísticos. La aplicación técnica de este tipo de materiales en el marco de una normativa internacional de carácter europeo puede considerarse también un planteamiento novedoso, ya que las principales aportaciones en este sentido suelen estar vinculadas a la normativa de EUA.

En tercer lugar con el uso de granulados de NFU's en sustitución de áridos convencionales se espera reducir los volúmenes de transporte de los NFU's después de la recolección, ya que la cantidad de este tipo de residuos está aumentando progresivamente. Este enfoque pretende aportar una solución al problema del exceso de almacenamiento de esta granulometría en las plantas de tratamiento. Un buen número de investigaciones se encuentran actualmente desarrollando nuevas líneas de implementación de materiales reciclados del NFU's. Con ello se pretende eliminar su condición de residuo y aumentar el valor de mercado y la utilidad de este material.

En general, se podría decir que la novedad que plantea esta investigación se centra en el análisis específico de una serie de granulometrías y mezclas de las mismas, de material no cohesivo, para caracterizar en laboratorio, obteniendo así sus parámetros geotécnicos a partir de los valores característicos, de acuerdo con las especificaciones del Código Técnico Español (CTE-DB-SE-C) y del Eurocódigo (EC7-1), con la finalidad de dar recomendaciones para los posibles usos.

### *2.3. Plan de trabajo y metodología*

Se pretende identificar, evaluar y caracterizar los materiales reciclados industriales, en específico los granulados de NFU's desde el ámbito de la geotecnia. El tema se abordará desde dos enfoques esenciales: la elaboración de pruebas de laboratorio y estimaciones de campo. De acuerdo con los pasos fundamentales de los programas de valorización

de un determinado residuo en aplicaciones geotécnicas [5], se pueden establecer de manera general los siguientes pasos:

- Identificación de la aplicación;
- Definición de los principales requisitos de la aplicación;
- Desarrollo de ensayos de caracterización en laboratorio;
- Modelación del comportamiento geotécnico;
- Preparación de especificaciones constructivas;
- Observación de los métodos de puesta en obra y del comportamiento in situ;
- Difusión de los conocimientos técnicos y científicos adquiridos.

Las tareas se desarrollaron en laboratorio y pruebas de campo para investigar más a fondo las propiedades técnicas. Para el desarrollo de la investigación fue necesario describir qué tipo de investigaciones se discutirían a lo largo de la experimentación. A continuación se enmarcan los tipos de investigaciones tomadas en cuenta:

\_ **Investigación de campo:** se estudian los temas o problemáticas a partir de la recolección y análisis de datos directos de la realidad. En estos casos es necesario utilizar el estudio estadístico, se manejan ciertas nociones y criterios probabilísticos para este tipo de trabajo.

\_ **Investigación documental:** se estudia un problema a partir de los análisis de datos y teorías previamente publicados en otros trabajos. En este tipo de investigaciones se utilizan las fuentes de consultas para postular ideas y conclusiones, propias de la investigación.

La metodología seguida para lograr la consecución de los objetivos anteriormente expuestos, se resume en las siguientes etapas, descritas según el orden cronológico que se siguió durante la realización del proyecto de investigación:

EL ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO SE CENTRÓ EN LOS SIGUIENTES ASPECTOS:

\_Producción y características de los granulados de NFU's. Recopilación de estudios científicos desarrollados en el ámbito de estudio, además de los propios informes que se

tengan de cada una de las plantas de tratamiento. Todos los gestores autorizados están obligados a dar información de acuerdo con el artículo 41 de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados. Generalmente son remitidos a las asociaciones correspondientes, como respuesta a la petición de información, o son datos que aparecen publicados en sus recursos web o en los informes o revisiones de los planes de gestión de residuos.

\_ Modelado de parámetros geotécnicos y correlaciones con las granulometrías estudiadas. Estudio de la bibliografía científica de las correlaciones existentes en los comportamientos del granulado de NFU's y sus correspondientes valores característicos.

\_Aplicaciones y puestas en marcha a partir de la recopilación de proyectos e investigaciones científicas. Se expondrán antecedentes y la situación de los NFU's, haciéndose un análisis crítico de la bibliografía al respecto con la finalidad de matizar los fundamentos teóricos, que confirmen la hipótesis del trabajo y establezcan estrategias de investigación.

### 2.3.1. Diseño del experimento

Se plantea el análisis específico de una serie de granulometrías ( $\leq 12\text{mm}$ ) y mezclas de las mismas, para caracterizar en laboratorio, obteniendo así parámetros geotécnicos a partir de los valores característicos y sus correspondientes correlaciones.

Se parte de que el granulado de NFU's posee propiedades que generan un abanico de posibilidades para ser utilizados un sustitución de áridos convencionales en aplicaciones del ámbito de la geotecnia. De este modo, se entiende que la combinación de ensayos de laboratorio con verificaciones de cálculo estadístico permite validar este posicionamiento. Para ello se han seguido las siguientes fases de trabajo:

- Identificación y análisis del estado del conocimiento en el área de interés, conocimientos previos de su tipología y complejidad tecnológica (trituration, clasificación, limpieza y cribado).
- Realización de ensayos de laboratorio para caracterizar diferentes tipos de combinaciones del material.

- Obtención de los valores característicos mediante el estudio estadístico de los resultados de los ensayos realizados para cada muestra.
- Obtención de modelos de comportamiento respecto a las correlaciones entre los valores característicos y las granulometrías estudiadas.
- Observaciones en puestas en obra del uso del material, obtención de condiciones técnicas a tomarse en cuenta a partir de los resultados en laboratorio, requisitos técnicos específicos: geométricos, físico, mecánicos e hidráulicos.

### 2.3.2. Análisis estadístico

#### ANÁLISIS DEL MODELO Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Se llevó a cabo un análisis del modelo elaborado en base a las siguientes tareas:

*Desarrollo de una base de datos de las características del granulado de NFU's:* El marco de estudio se centrará en el análisis de las diferentes muestras, desarrollando con independencia un rango de especímenes y muestras apropiado para la caracterización del conjunto total de valores. La selección de la muestra se ha realizado a partir de la producción y en base a una recopilación de datos.

*Modelado de los parámetros geotécnicos del granulado de NFU's:* La muestra global se define a partir de sus valores característicos, cada variable corresponde al conjunto de datos evaluado del granulado seleccionado. El modelo resultante estará confrontado a las características necesarias para su implementación, con el objetivo de encontrar validación de los datos considerados.

*Correlación de variables evaluadas:* Los factores de equivalencia se utilizan para convertir las características que guarda el conjunto de datos de la muestra y sus posibles relaciones. Evaluar los parámetros con mayor dispersión y su influencia con el resto de las variables. Se utilizan las herramientas de análisis que poseen este tipo de metodología con el fin de determinar nuevas relaciones de los ficheros: tamaños, tipos de materiales, usos, etc. entre los elementos estudiados, a través de la base de datos elaborada. Entre los resultados previstos se encuentra la obtención de parámetros geotécnicos de una gama detallada de tamaños de partículas inferiores a 12 mm.

## CONCLUSIONES Y DIFUSIÓN FINAL DE RESULTADOS

Se determinará el grado de avance del conocimiento producido con la aplicación de la nueva metodología establecida y se establecerán de líneas futuras para la investigación. A su vez, se llevará a lo largo de la investigación un plan de difusión de resultados.

### 2.3.3. Entorno del estudio

En general, las investigaciones referentes a la implementación de NFU's en obras de geotecnia se han centrado en el estudio de tamaños de triturado entre 76 mm y 305 mm, y de virutas que suelen oscilar entre 12 mm y 76 mm. En este sentido, esta investigación pretende exponer una gama detallada de partículas menores de 12 mm, que generalmente no se detallan en la literatura. Esto proporcionará una solución al problema del exceso de almacenamiento de este tamaño de partículas en las plantas de tratamiento.

Las investigaciones muestran un amplio rango de tamaños de partículas (0,8 mm a 400 mm), siendo muy limitados los estudios que se han centrado en la caracterización geotécnica de los tamaños de partículas inferiores a 12 mm, por lo que sus propiedades físicas y su comportamiento mecánico son en gran medida desconocidos.

Se procede a establecer el número de elementos a analizar en cada una de las escalas de trabajo planteadas, procediendo a la identificación exhaustiva de los mismos mediante ensayos y la construcción de una base de datos preliminar.

Se pretende generar una base de datos de las características que guardan los granulados de NFU's, para definir los parámetros geotécnicos de una gama detallada de tamaños de partículas inferiores a 12 mm. Se evaluó también la comparación con materiales convencionales y la problemática que presentan, con la finalidad de establecer un modelo de comportamiento para definir posibles aplicaciones.

Se llevó a cabo la revisión de la normativa nacional, informes, pliegos de prescripciones, guías y manuales de sectores administrativos, con la finalidad de evaluar los cumplimientos para el estudio de su aplicabilidad.

#### 2.3.4. Universo de la muestra

Todos los materiales analizados se obtuvieron a partir de un plan específico de toma de muestras de carácter representativo (especificando ensayos y frecuencia). La toma de las muestras para los ensayos siguió el procedimiento indicado en la norma UNE EN 932-2 [33], o siguiendo un método de recogida de muestras en big-bag como se menciona en CEN/TS 17188 [34].

#### ELECCIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CARACTERIZACIÓN A LOS GRANULADOS DE NFU'S

Con toda la información recopilada se generó una base de datos de las características obtenidas en el universo de la muestra, se compararon, reclasificaron y evaluaron. El marco de estudio se centró en el análisis de 2 plantas de tratamiento de NFU's en Andalucía inscritas en el padrón de Gestores. La selección de la muestra se ha realizado a partir de la producción y en base a una recopilación datos (Tabla 1).

Tabla 1. Universo de la muestra: material granular de NFU's de las plantas de tratamiento en Andalucía.

<b>PLANTA DE TRATAMIENTO</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>LOCALIDAD</b>
RENEAN	Material granular de 0'00 - 0'60 mm	JAÉN
	Material granular de 0'60 - 2'00 mm	
	Material granular de 2'00 - 4'00 mm	
RMD	Material granular de 0'00 - 0'80 mm	SEVILLA
	Material granular de 0'60 - 2'00 mm	
	Material granular de 2'00 - 7'00 mm	

Se realizó un estudio de las fuentes válidas para la construcción de la base de datos del modelo. Al tratarse de un trabajo que estudia los parámetros geotécnicos a partir de los valores característicos, resultó necesario realizar un estudio preliminar del tipo de información con la que se cuenta, en base a los siguientes criterios:

- Resultados de pruebas de laboratorio externos a la planta de tratamiento.
- Autoevaluación de las mismas plantas de tratamiento.
- Comparativa datos de plantas contra datos de proyectos, artículos científicos o tesis del mismo material y mismas condiciones.

A continuación se muestra un esquema de las propiedades globales que se analizaron en la transcurso de la investigación.

### **PROPIEDADES GEOMÉTRICAS**

- Granulometrías (curvas granulométricas, módulo granulométrico) UNE-EN 933-1 y UNE-EN 933-2 o UNE 103101
- Contenido de finos (%) UNE-EN 933-2
- Contenido de partículas < 4 mm (%) UNE-EN 933-2
- Porcentaje de partículas trituradas UNE-EN 933-5
- Ensayo para la clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados UNE-EN 933-11.

### **PROPIEDADES FÍSICAS**

- Densidad real UNE-EN 1097-6
- Densidad del suelo UNE 103-302-94
- Coeficiente de absorción y porosidad UNE-EN 1097-6
- Limite líquido UNE 103103
- Límite plástico UNE 103104
- Hinchamiento libre UNE 103601
- Humedad natural UNE 103300
- Clasificación de suelo UNE 14688-1 Y UNE 14688-2

### **PROPIEDADES MECÁNICAS**

- Resistencia a la fragmentación UNE-EN 1097-2
- Compresión simple en probetas UNE 103400
- Esfuerzo cortante UNE 103401
- Ensayo de compactación. Proctor normal UNE 103501

Dichas pruebas no contemplan en el análisis de control de las plantas de tratamiento, pero de acuerdo con la bibliografía consultada es necesario que se realice un seguimiento de los controles de calidad de los materiales resultantes de los procesos de trituración, con la finalidad de aunar en los estándares que promuevan su implementación.

### **CRITERIOS PRELIMINARES PARA LA BASE DE DATOS DEL MODELO**

Atendiendo al esfuerzo de integrar todas las características que guardan los granulados de NFU's, se presenta una propuesta metodológica inspirada en la realización de una



clasificación textual (clasificación de las características de cada elemento por campos de conocimiento) y otra clasificación gráfica (dibujo de cada uno de los componentes de la generalidad de una manera individual y pormenorizada) de los elementos analizados. Dicho método se realizó a través de un estudio estadístico comparativo de semejanzas y diferencias existentes entre las granulometrías evaluadas, siendo este el caso de las características geométricas, mecánicas y físicas.

#### CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE POSIBLES APLICACIONES

El criterio de evaluación que siguió para el estudio de los posibles usos, se realizó de acuerdo con las distintas aplicaciones de los NFU's, se han subdividido en tres grupos:

- Aplicaciones ya implantadas.
- Aplicaciones en fase de desarrollo.
- Aplicaciones potenciales todavía no desarrolladas.

#### 2.4. *Trayectoria investigadora*

La doctoranda de la presente tesis ha realizado los siguientes trabajos preliminares que reflexionan sobre el potencial que encierran los materiales reciclados:

\_Tesis Maestría en Infraestructura de Transporte en la rama de las vías terrestres. 2014-2016. UMSNH.

##### *"Evaluación de Áridos Reciclados, para su implementación en Pavimentos Rígidos"*

Se buscaba determinar si era factible utilizar áridos gruesos reciclados en la elaboración de hormigones para pavimentos rígidos, tomando en consideración la identificación y descripción de los mismos. De acuerdo con los resultados obtenidos durante la experimentación, se puede concluir que los áridos gruesos reciclados procedentes de la demolición de edificios, pavimentos de hormigón hidráulico y especímenes de laboratorio, pueden considerarse como áridos gruesos en la fabricación de nuevos hormigones para pavimentos rígidos. A partir de la prueba de flexión realizada, este estudio demostró que la implementación de áridos reciclados para hormigones en pavimentos rígidos no tiene afectaciones relevantes. Como ejemplo, se expone la

disminución media de las muestras a los 28 días que fueron de tan sólo el 2.02% con respecto a la mezcla testigo.

\_Tesis Licenciatura en Ingeniería Civil. 2012-2014. UMSNH

*“Comportamiento de un concreto ecológico, elaborado con áridos producto de la demolición y baja relación agua/cemento”*

En esta investigación se pretendía dar a conocer el comportamiento físico-mecánico de hormigones ecológicos elaborado con áridos reciclados en comparación con hormigones con áridos convencionales, con bajas relaciones agua/cemento, para dar a conocer las mayores resistencias que se pueden dar en hormigones generados con áridos reciclados. Se concluyó que la reutilización de hormigón hidráulico que ya cumplió con su vida útil para la generación de un nuevo hormigón, puede considerarse una solución factible para contribuir a solucionar parcialmente los problemas de contaminación ambiental. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta las propiedades del árido reciclado al momento de utilizarlos ya que cambiarán en función del tipo de construcción.

### **3. RESIDUO DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD'S)**

Entre los residuos que han sido objeto de un mayor número de estudios y de los que se dispone de un mayor número de experiencias prácticas en España como materiales aprovechables en la construcción, se encuentran los Residuos de Demolición y Construcción (RCD's) y los Neumáticos fuera de uso (NFU's).

La implementación de NFU's en obras de ingeniería ha sido objeto de un menor número de investigaciones que los áridos RCD's, debido en parte a los altos costes de producción en comparativa con estos, lo que afecta negativamente en la elección del material a utilizar, aunado a la falta de normativa específica que promueva su implementación.

Con la finalidad de comparar y establecer las bases de la experimentación de los granulados de NFU's, se hace un estudio a detalle de los RCD's, por ser de los materiales que tienen más información e implementación en puestas en obra. Si bien se ha

comprobado que en relación a las características no presentan similitudes, se pueden establecer puntos de apoyo que beneficien en el momento de evaluar el modelo de estudio de los NFU's.

### *3.1. Problemas de la valorización de los áridos RCD's*

El sector de los RCD's ha tenido que asumir problemáticas de diferente índole. En los últimos años se han disminuido las demoliciones a gran escala, los vertederos se llenan de RCD's sin tratar [35]. Por otro lado, las características dispares de los RCD's, en cuanto a demanda de agua, resistencia mecánica, resistencia a agentes químicos, reactividad con otros componentes, etc., han hecho difícil estandarizar sus características para su comercialización. Cabe recalcar que el precio de venta del árido reciclado está limitado por la cotización en el área de influencia del árido convencional. En general, el árido reciclado debe tener un precio de venta inferior al del árido natural, para contrarrestar, en gran parte, las reticencias sobre su utilización.

La cadena de los RCD's cuenta con diferentes fases que producen obstáculos para su implementación. Los gestores de residuos se encargan de las operaciones de almacenamiento, selección, reciclaje y eliminación, orientadas a dar a los residuos producidos el destino más adecuado desde el punto de vista medioambiental. Dentro de las actividades de valorización y eliminación se encuentra el estudio de los aspectos medioambientales por parte de la administración pública, los cuales certifican la correcta gestión de los residuos y, en consecuencia, liberan las correspondientes fianzas municipales depositadas por el productor de los RCD's. Todo esto produce retrasos en su gestión.

La mayor parte de los RCD's se consideran inertes o asimilables a inertes, y por lo tanto su poder contaminante es relativamente bajo. Los residuos inertes no son solubles ni consumibles, ni reaccionan física ni químicamente, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto [11]. Sin embargo, aún existe mucha desconfianza en su implementación.

La nueva legislación europea en materia de residuos supone un cambio "radical" en la concepción de la gestión de RCD's, orientándose hacia la economía circular y potenciando su reutilización. La normativa estableció que para 2020, al menos el 70% de todos los RCD's serían sometidos a procesos de valorización y reutilización, disminuyéndose el consumo de áridos naturales con el consiguiente impacto ambiental y energético en su extracción y elaboración. Hasta el momento no se cuenta con cifras exactas, se desconoce si se han cumplido los objetivos planteados.

### 3.2. Clasificación, composición y características de los RCD's

#### 3.2.1. Definición de los áridos de RCD's

El Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, define por Residuo de Construcción y Demolición (RCD) [36], como: "cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de residuo incluida en el artículo 3.a de la Ley 10/1998", hoy derogada por la Ley 22/2011, que "se genere en una obra de construcción o demolición".

El Catálogo Europeo de Residuos (CER) [37], en el capítulo 17 (Residuos de la construcción y demolición), indica las siguientes divisiones:

- 17 01 Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
- 17 02 Madera, vidrio y plástico
- 17 03 Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados
- 17 04 Metales (incluidas sus aleaciones)
- 17 05 Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje
- 17 06 Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto
- 17 08 Materiales de construcción a partir de yeso
- 17 09 Otros residuos de construcción y demolición

En el II PNRCD (Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición) se habla de las obras de construcción y demolición comprendidas en las actividades consistentes en la

construcción, reparación y demolición de una edificación incluyendo también al ámbito de ingeniería civil.

Se puede establecer una tipología de los áridos según la naturaleza de los escombros de procedencia [38]:

- **El árido reciclado de hormigón** es el árido procedente del procesamiento de escombros de hormigón: contiene en su mayoría árido de hormigón y mortero adherido. Las diferencias de composición pueden ser notables en función de la proporción de mortero presente en el residuo, pero en general su composición está dada por cemento, agua, áridos, aditivos y adiciones. Se trata, por tanto, de áridos con un contenido de partículas de hormigón superior al 90%.

- **El árido reciclado cerámico** es aquel que proviene del procesamiento de escombros de tipo cerámico: ladrillos, tejas, azulejos, etc. Se considera aquel que contiene al menos un 65% en peso de ladrillo y/o ladrillo sílico-calcáreo, mezclado o no con hormigón.

- **El árido reciclado mixto** es aquel que procede de una mezcla de residuos de hormigón y cerámicos. En la normativa holandesa se define como un árido reciclado que debe contener un porcentaje de hormigón superior al 50%, con una densidad seca superior a  $2100 \text{ kg/m}^3$  y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de diferente naturaleza que el hormigón, incluyendo el material cerámico, con una densidad seca superior a  $1600 \text{ kg/m}^3$  [39].

### 3.2.2. Clasificación de los áridos RCD's

Los áridos reciclados tienen dos criterios básicos de clasificación: la granulometría o distribución del tamaño del grano y la composición del material contenido (según provengan de asfalto, hormigón, piedra, cerámicos, etc.).

Los RCD's pueden clasificarse de diferentes formas, según el criterio que se analice. Los parámetros más utilizados suelen ser su procedencia y su naturaleza. Tanto si el residuo que llega a la planta es de única naturaleza como si es una mezcla de varios o de todos, se consideran RCD's. Posteriormente, se clasifican en materiales no homogéneos (no

mezclados o de naturaleza pétreo), y en heterogéneos (mezclados o sucios). Dicha clasificación es fundamental para tratarlos de forma diferente y así optimizar los procesos de valorización [40].

El II PNRC [41] establece las posibles procedencias de estos residuos:

- La ejecución de obras para la implantación de servicios en las zonas urbanas.
- Las obras de reforma en calles del casco urbano.
- Las obras menores de rehabilitación de viviendas.
- Las originadas en reparaciones de carreteras e infraestructuras.
- La mezcla de los escombros de construcción y / o demolición de edificios.
- Los rechazos o roturas de la fabricación de piezas y elementos de construcción.

IHOBE (2004) [42] clasifica a los RCD's basándose en el hecho de que la Unión Europea (y la mayoría de sus estados miembros) está orientando la política de gestión de los RCD's hacia un reciclaje masivo de los mismos. De acuerdo con ello, se pueden agrupar en base a aspectos como la separación selectiva, la recogida selectiva y también la peligrosidad de parte de los mismos. Así, un posible agrupamiento de los RCD's podría ser el siguiente:

- RCD's peligrosos y potencialmente peligrosos.
- RCD's no inertes que justifican una separación y recogida selectiva.
- RCD's inertes que justifican una separación y recogida selectiva.

En cuanto a la clasificación en base a su naturaleza, muchos autores establecen tres categorías [41], [43] :

- **Residuos inertes:** No presentan ningún riesgo de polución de agua, de los suelos y del aire y, en general, están constituidos por elementos minerales estables o inertes, en el sentido de que no son corrosivos, irritantes, inflamables, tóxicos, reactivos.
- **Residuos banales o no especiales:** Por su naturaleza, pueden ser tratados o almacenados en las mismas instalaciones que los residuos domésticos, diferenciándoles claramente esta característica de los residuos inertes y de los que son potencialmente peligrosos, pues determina sus posibilidades de reciclaje.

- **Residuos especiales:** Son potencialmente peligrosos, por lo que pueden ser considerados como residuos industriales especiales. Suelen tener sustancias inflamables, tóxicas, corrosivas, irritantes, cancerígenas o que provocan reacciones nocivas en contacto con otros materiales. Estos residuos requieren un tratamiento especial con el fin de aislarlos y de facilitar el tratamiento específico o la deposición controlada.

### 3.2.3. Composición de los áridos RCD's

El laboratorio de Estructuras y Materiales del CEDEX realizó entre los años 2003 y 2010 dos proyectos de investigación, con la participación de universidades y centros de investigación de España, con la finalidad de buscar aplicaciones de áridos reciclados de hormigón y mixtos en la fabricación de nuevos hormigones. Las conclusiones fueron anexadas a la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), donde se indicó la composición media de los RCD's, entre los que se encuentran productos cerámicos, residuos de hormigón, material asfáltico, y en menor medida otros componentes como madera, vidrio, plásticos, etc. (Ilustración 6) [44].

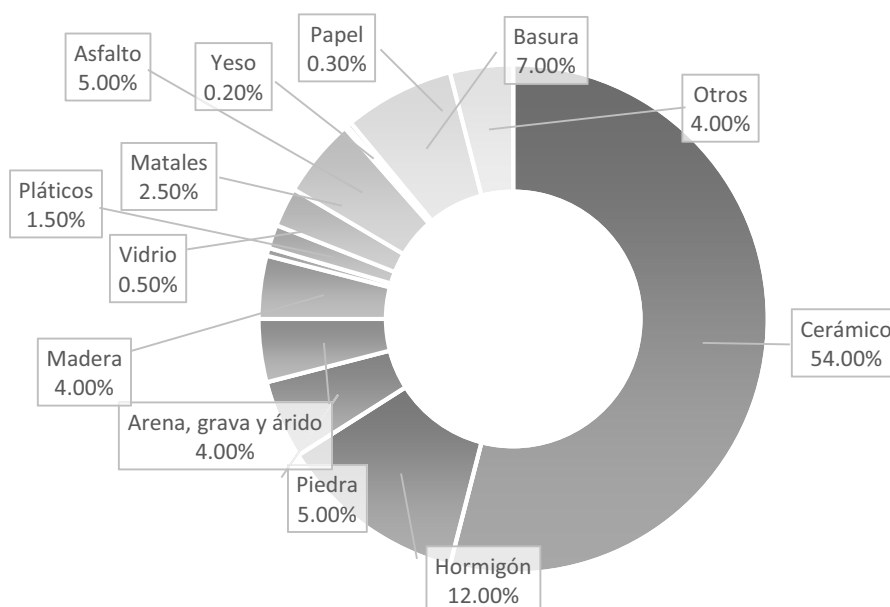


Ilustración 6. Composición de los Residuos de Construcción y Demolición. Fuente: [38], [45].

De forma simplificada, se puede decir que un contenedor de obra de reforma tiene un 80% de productos de origen pétreo y un 20% de productos mixtos de la construcción. Entre los primeros se encuentran (Tabla 2) [46]:

Tabla 2. Porcentajes de elementos que componen los RCD's. Fuente: [38].

RCD'S origen pétreo 80%		RCD'S origen mixto 20%	
<i>Cerámicos</i>	54%	Voluminosos	7%
<i>Hormigón</i>	17%	Varios	6,5%
<i>Asfaltos</i>	5%	Madera	4%
<i>Tierras y piedras</i>	4%	Metales	2.5%

#### 3.2.4. Características de los áridos RCD's

Los áridos RCD's pueden presentar una gran heterogeneidad en sus propiedades, dependiendo principalmente de la calidad del material que entra en la línea de reciclaje y del tipo de procesamiento efectuado en la planta. Sin embargo, mediante el control de estos dos parámetros, se puede obtener un árido de una calidad adecuada para muchas aplicaciones en ingeniería civil [47].

La distribución granulométrica del árido reciclado es una de las propiedades que más se puede controlar en las plantas de tratamiento. Tiene un papel primordial en la elección de la dosificación del hormigón, ya que afecta a las propiedades de trabajabilidad, grado de compactación, resistencia, porosidad, permeabilidad y durabilidad del hormigón resultante [40].

Diversos estudios han demostrado que el contenido de mortero está directamente relacionado con propiedades como: la densidad, el coeficiente de absorción y el desgaste de los Ángeles [48]. En otros estudios se encontró una relación entre la absorción y el coeficiente de desgaste, donde se observa que a mayor absorción, mayor es el coeficiente de desgaste [9].

El módulo granulométrico del árido reciclado, para un mismo tamaño máximo de árido, presenta pequeñas variaciones, dependiendo principalmente del sistema de triturado y, en menor medida, de la calidad del hormigón original [49, p. 102]. Algunos estudios han



valorado la forma del árido a través de su angulosidad, concluyendo que las partículas de áridos reciclados son más angulosas [50]. Las fracciones de menor tamaño, en el caso de los áridos gruesos, son las que presentan una forma más desfavorable, utilizando como referencia tanto el coeficiente de forma como el índice de lajas [51].

El tamaño del árido RCD's influye de manera decisiva sobre la absorción. En las fracciones más finas, la absorción es mayor, en función del mortero adherido [52] (cuyo porcentaje varía entre 25-60% [17]), provocando también una textura más rugosa y porosa [53], lo cual tiene a su vez una influencia decisiva sobre la capacidad de absorción de agua. La absorción específica y la velocidad de absorción en los áridos reciclados es mayor que en los áridos convencionales [54]. El porcentaje de árido grueso obtenido suele variar alrededor del 70-90% del árido total producido. La EHE-08 [55] indica que el coeficiente de forma del árido grueso debe ser superior a 0,20.

El mortero adherido también provoca densidades inferiores que las del árido convencional [56, p. 106]. La densidad suele oscilar entre 2.100 y 2.400 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2.300 y 2.500 kg/m<sup>3</sup>, de manera que en todos los casos, se pueden considerar estos áridos de densidad normal (no ligeros) [52].

En la mayoría de los estudios se observa el mismo comportamiento. En las preparaciones de hormigón se distingue una disminución de la densidad y un incremento de la absorción de agua y porosidad, a medida que incrementa el de sustitución del árido. Se establece una relación lineal entre la disminución de la densidad aparente de los hormigones fabricados con RCD's y las propiedades de resistencia a flexión y compresión [11].

Las propiedades producidas por el contenido de mortero adherido en los áridos reciclados (menor densidad y mayor absorción), ejercen un cambio significativo en su comportamiento, ya que afecta negativamente al módulo de elasticidad del hormigón, a su retracción, fluencia y durabilidad [26].

Julie Anne [57] analizó diferentes porcentajes de sustitución de árido reciclado grueso, y visualizo que entre más elevado es la sustitución de RCD's más baja la resistencia a

compresión. Es importante mencionar que el árido de RCD's en algunos casos puede funcionar como un foco de propagación de la carbonatación, porque no impide el paso del CO<sub>2</sub> como un árido convencional, por lo que se establece siempre realizar la prueba de carbonatación a la muestras a implementar [44]. Por lo tanto, esto condiciona el comportamiento del hormigón que se fabrique con ellos. Cuando los áridos reciclados son producto de una sola etapa de trituración (cono o mandíbula) la resistencia del hormigón varía entre el 93% al 97% de la resistencia del hormigón de control [58].

Analizando el contenido de mortero en el árido reciclado, se conoce que su comportamiento depende en gran medida de la relación a/c del hormigón de origen. La interfaz que se crea en la zona de transición del mortero de la pasta de cemento endurecida próxima a la superficie de los áridos es distinta a la que se presenta en la interfaz árido - pasta; esta región constituye la zona de transición, su espesor dependerá de diversas variables, pero es, como máximo, de unas 50 µm [59]. Con el aumento del tiempo de hidratación, la resistencia de dicha zona puede llegar a ser incluso mayor que la del mismo mortero [26].

### 3.2.5. Plantas de tratamiento y valorización de los áridos RCD's

La innovación en las plantas de tratamiento es sin duda uno de los grandes retos a cumplir. La tecnología utilizada para el reciclaje de los RCD's permite maximizar la recuperación de recursos de alta calidad y reducir a la vez los costes de procesamiento y eliminación. Sólo una adecuada planificación de las instalaciones para dotarlas de las tecnologías más avanzadas permitirá alcanzar los objetivos fijados en el 2030 [16].

El proceso de las plantas de valorización o reciclaje de RCD's inicia con la entrada del material que tras una serie de procesos de trituración y tratamiento, se transforma en áridos reciclados. Es de esperar que todas las plantas cuenten con un protocolo para garantizar el correcto cumplimiento de sus funciones. Este proceso incluye la separación según su volumen, composición y granulometría en diferentes acopios, que continúa con la separación de los metales, maderas, papel y cartón, y otros materiales de gran volumen no aptos. Por último, el material pasa por una cribadora donde es separada su fracción

más fina, como arenas y arcillas, para pasar a la máquina trituradora donde se obtiene el producto final reciclado [58].

Para entrar a detalle sobre las plantas de tratamiento es importante mencionar previamente cómo se lleva a cabo su dimensionamiento, que depende del número de habitantes en un área de 30 Km<sup>2</sup> (40 Km<sup>2</sup> como máximo, si no hubiera ninguna otra planta en dicha zona de influencia). Siempre se parte de que cada habitante produce alrededor de 1 tonelada al año, que sólo se trata de media el 40% y que únicamente se valorizan y pasan a RCD's un 12-15% de los que se generan en España, se puede realizar una estimación básica de la cantidad de RCD's de las plantas [60].

Actualmente, y con el fin de conseguir áridos reciclados de mejor calidad, se ha implementado una etapa adicional de separación hidráulica que optimice la retirada de los contaminantes más ligeros (yesos), dejando el material pétreo más limpio. Para una muestra homogénea, dichos estudios indican que la fracción ligera está formada por la fracción no pétreo y yesos, la fracción media por cerámicos y la fracción pesada principalmente por hormigón. Sin embargo, en España solamente un el 15% de las plantas activas cuentan con dichos equipos [61].

### 3.3. *Europa y España: Áridos RCD's.*

#### 3.3.1. Marco legal y régimen jurídico europeo de RCD's

Las directrices de la Comunidad Europea en materia de gestión de residuos, establecen como prioritarias las alternativas de reducción, reutilización y reciclaje, anteponiendo este tipo de principios al vertido, que se convierte en la última opción. Existen diferentes directrices que lo garantizan:

- Directiva 1996/61 "Prevención y Control integrados de la Contaminación".
- Directiva 1999/31 "Vertido de Residuos".
- Decisión 738/2000 "Aplicación de la Directiva 1999/31".
- Decisión de la Comisión 2000/532/CE, que establece una lista de residuos de conformidad con la Directiva 75/442/CEE, y sus modificaciones, efectuadas mediante la decisión de la comisión 2001/119/CE.

- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.

A continuación se enlista la bibliografía sobre la normativa técnica internacional relacionada con la implementación de los RCD's en hormigón (Tabla 3) [41] .

*Tabla 3. Normativa internacional sobre RCD's. Fuente: [41].*

<b>PAÍSES</b>	<b>NORMATIVA</b>
<i>JAPÓN</i>	"Proposed standard for the use of recycles aggregate and recycled aggregate concrete" .Building Contractors Society of Japan (BCS). 1977. "Proposed Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Structures Made Using Recycled Aggregate". 1986. "Proposed Specification for Concrete Containing Recycled Coarse Aggregate" 1996.
<i>AUSTRALIA</i>	Guía australiana para la utilización de árido reciclado (RCA) en hormigón. 1998.
<i>CHINA</i>	Recomendaciones BS 812. 2002.
<i>ALEMANIA</i>	DIN 4226-1:2000: "Concrete Agrégate".
<i>REINO UNIDO</i>	BSG "Use of industrial by-products and waste materials in building engineering". British Standard Guide 6543. 1985. "Recycled Aggregates: BRE Digest 433" 1998. "Quality Control: The production of Recycled Aggregates. BR 392". ISBN 186081381 X. BS 8500-2:2002: "Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. WRAP "Mix Design Specification for Low Strength Conetes containing Recycled and Secondary Aggregates". 2002.
<i>BRASIL</i>	"Recycled Aggregate Standardization in Brazil". Universidad Estadual paulista, Centro Universitario do Instituto Mauá de Tecnología, Universidad de Taubate.2004.
<i>FRANCIA</i>	Guide technique pour lilisation des matériaux régionaux d'le- de- France: les bétons et produits de démolition recyclés - LCPC, Paris. December 1996.
<i>DINAMARCA</i>	Danish Concrete Association. "Recommendations for the use of recycled aggregates for concrete in passive environmental class". Publication N°34, 1990.
<i>PAISES BAJOS</i>	CUR report nr. 125 "Crushed Concrete Rubble and Masonry Rubble as Aggregate for Concrete".
<i>AUSTRIA</i>	Austrian Quality Protection, Association for Recycled Building Materials. "Guidelines for recycled building materials".1992. Guidelines for Recycled Construction Materials from Building Construction, Application Cement-bonded Substances. Guidelines for Recycled Construction Materials from Building Construction, Application Unbound Substances.

### 3.3.2. Situación en Europa

Debido a la disponibilidad de áridos naturales y a la facilidad y bajo coste del vertido de desechos (escombros, residuos industriales), el reciclado ha sido históricamente bajo en España y en el mundo en general. A pesar de ello, esta situación ha cambiado gracias a las políticas de gestión de residuos y también a las iniciativas privadas, que promueven el reciclaje por motivos medioambientales, indicando que la moderada explotación produce una condición sostenible en los áridos y apostando por la recuperación de los mismos.

En la UE, la falta de confianza en la calidad de los materiales reciclados se presenta como una de los obstáculos a la hora de reciclar y reutilizar residuos. Esta desconfianza restringe y reduce la demanda de materiales reciclados, contraponiéndose al desarrollo de infraestructuras de reciclaje en la UE.

Existen múltiples experiencias en todo el mundo sobre la implementación de áridos reciclados en procesos de construcción. Prevalecen sobre todo los lugares en los que el árido natural es escaso y costoso, por ejemplo los países del centro de Europa (Bélgica y Holanda), donde se tienen estadísticas de que se llega a reciclar entre el 80 y 90% de los RCD's [62]. Cabe señalar que buena parte se recicla para volver a ser utilizado como material de construcción, donde se da un valor igualitario del árido reciclado de baja calidad.

En el panorama internacional se observa que el grado de reciclaje de cada país depende principalmente de la disponibilidad de materias primas, del volumen generado de cada residuo y del impacto medioambiental que suponga el depósito en vertedero. Asimismo, algunas iniciativas administrativas adoptadas en diferentes países han tenido efectos muy positivos, al conseguir elevar de forma considerable los niveles de reciclaje [46].

Tam [63] realizó una extensa encuesta de campo en industrias de construcción japonesas y australianas y concluyó que en Australia la opinión predominante sigue siendo que los áridos reciclados son costosos y tienen aplicaciones limitadas, lo que lleva al autor a proponer una política unificada de reciclaje.

La situación que guardan los RCD's en Finlandia es muy crítica ya que de todos los áridos utilizados en ese país en 2013, sólo el 1% deriva de RCD's. Esta cifra está muy por detrás de Holanda, donde el 25% de los áridos que se utilizan tienen origen reciclado [64].

### 3.3.3. Situación en España

Desde 1993 se desarrolla en España el sector de los RCD's, para el año 1995 se contaba con tres plantas de tratamiento, tratándose el 1,5% de los RCD's producidos, mientras que la media europea ya se encontraba en el 28% [40]. Para el 2000, se contaba con 50 plantas con un 5-7% de RCD's tratado, en Europa se contaba con el 43% de RCD's tratado [61]. Se indica que la gestión de RCD's en España en el periodo 2011-2015, reflejaba que el 70% de todos los RCD's producidos se disponían en plantas de gestión y tratamiento. De este 70%, el 39% se ha reciclado, un 24% termina depositado en el vertedero, y un 7% se encuentra acopiado (stock). Un 30% de la producción puede considerarse incontrolada y depositada en lugares no autorizados [65].

A nivel Estatal, la legislación básica en materia de RCD's la forman la Ley 22/2011 sobre residuos y suelos contaminados, que transpone la Directiva Europea Directiva 2008/98/CE sobre residuos, y de manera específica el Real Decreto 105/2008 por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición [45].

#### **Ley 22/2011 sobre residuos y suelos contaminados**

De la cual se destaca lo siguiente:

- Implementación de tipos de obras: menores sin exigencia de proyecto técnico, y las mayores con apartado de intervención dentro del proyecto.
- La aplicación obligatoria del Principio de la Jerarquía de residuos, siguiendo el orden de: Prevención, Reutilización, Reciclado, Valorización energética y Eliminación.
- La correspondiente obligación ya sea del productor u otro poseedor inicial de la gestión de sus residuos.

- El cumplimiento del productor a constituir una garantía o fianza respecto a los costes de reparación y recuperación del medio ambiente y la gestión de los residuos.

### **Real Decreto 105/2008 sobre RCD's**

De acuerdo con la normativa específica de los RCD's se debe cumplir:

- Se especifica la diferencia entre productor (promotor) y poseedor (contratista).
- Se requiere el Estudio de Gestión de Residuos (EGR) para toda obra mayor y en función de este, el establecimiento de la fianza a la concesión de la licencia.
- Se realiza la obligatoriedad del productor de establecer una garantía o fianza respecto a los costes de reparación y recuperación del medio ambiente y la gestión de los residuos.
- Se establece que los Ayuntamientos por medio de sus ordenanzas municipales, regulen la gestión de los residuos domésticos provenientes de las obras menores.

## **4. RESIDUOS INDUSTRIALES: GRANULADOS DE NFU's**

### **4.1. Aspectos generales de la Industria de los NFU's**

#### 4.1.1. Problemática de la Industria de los neumáticos

En la actualidad, EUA, la UE, Japón y la India producen casi el 88% de los NFU's en todo el mundo [66]. Los NFU's representan aproximadamente 6,7 millones de toneladas de residuos en la UE cada año. Francia, el Reino Unido, Italia y España son responsables de aproximadamente el 80% de la producción europea de residuos generados por los NFU's [32], [67]. Si se tiene en cuenta que el 70% del neumático es caucho [67], se puede afirmar que en la Unión Europea se generan anualmente unos 4,7 millones de toneladas de granulado de caucho.

En cuestión de la evolución dentro de la UE de la gestión de los NFU's, entre los años 1998 y 2006, se tiene como datos relevantes los comentados a continuación [68, p. 90]:

- En 1998 el 40 % de los NFU's de los 12 países fueron depositados en vertedero, y sólo el 60% fue tratado por otras vías.
- En 2006 la situación ha sido totalmente diferente: en los 15 países miembros, el 87 % de los neumáticos usados fueron llevados a reutilización, recauchutado, reciclado o recuperación energética, y un 13% fueron llevados a vertedero.
- Las dos vías principales de valorización, son el reciclado y la recuperación energética, a las que se destinan el 71% de los NFU's.

Aunque el NFU's no es considerado como un residuo tóxico ni peligroso, es importante recordar los siguientes aspectos [69, p. 26]:

- Según los datos proporcionados por la Oficina de Estadísticas de Australia, la vida útil promedio de un neumático estándar es de tan solo 4 años (40.000/50.000 Km), teniendo que ser remplazado en un corto periodo de tiempo. Se acumulan rápidamente grandes cantidades de neumáticos de desecho.
- Es un material no biodegradable, por lo que su persistencia en el tiempo puede alcanzar largos períodos. Se requieren 10 siglos para que un neumático se degrade y desaparezca de la naturaleza [28].
- Los problemas de sobreacumulación de residuos industriales se han convertido en un problema mundial, especialmente en lo que respecta a los residuos que ocupan espacios de almacenamiento tan grandes como los NFU's [29].
- El principal problema relacionado con las grandes superficies de almacenamiento de neumáticos es su alta inflamabilidad y los riesgos potenciales para el medio ambiente y la salud humana [70]–[72]. Su alta capacidad calorífica pueden provocar incendios de grandes magnitudes difíciles de controlar.
- La quema directa provoca graves problemas medioambientales debido a las emisiones de gases nocivos.
- En el caso de ser almacenados contribuyen a la proliferación de roedores e insectos, los mosquitos portadores de enfermedades pueden encontrar un caldo de cultivo [73], como por ejemplo los transmisores de enfermedades como el dengue.

Para la fabricación de un neumático se necesitan grandes cantidades de energía, aproximadamente medio barril de petróleo crudo para fabricar un neumático de camión



[74]. En el 2000 en España, se generaban anualmente unas 250.000 toneladas de NFU's, de las que sólo se reciclaba el 1,5 %. El 11,1 % se destinaba a recauchutado, el 4,6%, a valorización energética, y el 82,8% acababa abandonado o depositado en vertederos. El stock histórico existente era de alrededor de cuatro millones de toneladas de NFU's en vertederos y áreas incontroladas que debía gestionarse [75]. A continuación se ilustra (ver Ilustración 7) el inventario de acopios abandonados [76] en el 2017 en España.

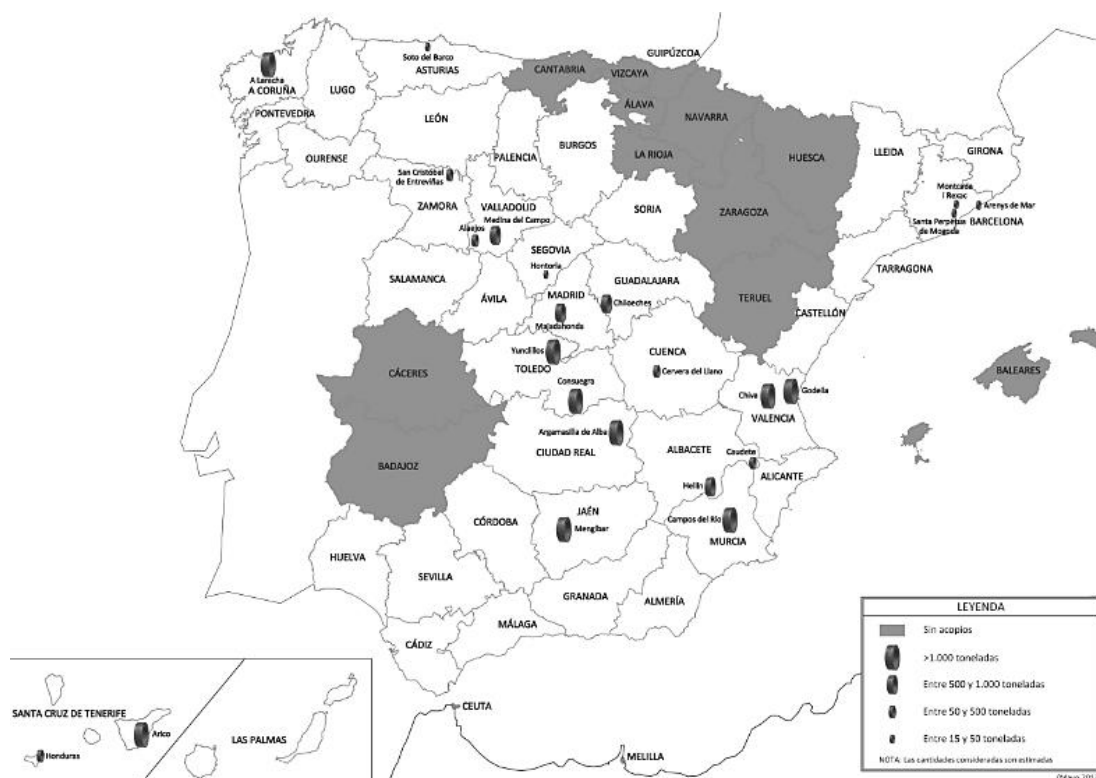


Ilustración 7. Acopios abandonados inventariados en España (mayo 2017) [77, p. 28].

La representación final en un mapa de la localización de los acopios permite entender la extensión del problema [76]. En 2017 existían 9 acopios de más de 1000 toneladas: A Laracha (Galicia), Yuncillos, Consuegra y Argamasilla de Alba (Castilla-La Mancha), Campos del Río (Murcia), Chiva y Godella (Valencia), Arico en Tenerife (Canarias) y Mengíbar (Jaén) [76]. Esto hace que sea importante desarrollar nuevas aplicaciones y nuevos mercados para este residuo industrial.

Para encontrar soluciones a los problemas medioambientales y a las amenazas para la salud causadas por los residuos de neumáticos, los países con las mayores industrias

disponen de un marco legal para su gestión. Hasta la fecha, la normativa se ha centrado en las características generales que deben tener los NFU's en las plantas de tratamiento. En las últimas décadas se ha producido un notable aumento del interés de la investigación internacional sobre las propiedades y los posibles usos de los NFU's en aplicaciones sostenibles [78]. En este sentido, los NFU's presentan características atractivas en la ejecución de obras de ingeniería civil y su aplicación ha sido estudiada desde hace más de 40 años [79].

#### 4.1.2. Impacto del uso de granulados de NFU's

El uso de granulados de NFU's a gran escala han sido probado desde la década de 1980, sus principales usos han sido como material de carreteras, material relleno ligero y como capas de drenaje en los vertederos. Las experiencias muestran que el uso de trozos de neumáticos es beneficioso desde el aspecto de la ingeniería y económico, y que la lixiviación, en base a los elementos estudiados y compuestos, es un problema menor [80, p. 14].

Sin embargo, aún sigue siendo limitada su implementación. En la actualidad, entre las medidas de reutilización más demandadas está el recauchutado, la construcción de pistas deportivas y campos de césped artificial, parques infantiles, y como combustible para centrales de fabricación de cemento. En cambio, en el sector de la construcción se reutiliza menos del 1% [81]. La mayoría de los neumáticos de desecho, especialmente en los países en desarrollo, se almacenan, se depositan en vertederos o se arrojan en el país ilegalmente [82]. En 2020, según SIGNUS el 16% del material puesto en mercado fue destinado a exportación [83].

Se ha estudiado la idoneidad del uso del granulado de NFU en aplicaciones subterráneas. Los límites aceptables para metales y compuestos orgánicos en el lixiviado de estos se analizan en ASTM D 6270 (2004) [84], que proporciona pautas para el uso de llantas de desecho en aplicaciones de ingeniería civil. Según varios estudios, los resultados de la prueba del procedimiento de lixiviación de características de toxicidad (TCLP) muestran que los trozos de llanta no son un peligro para la salud humana.

En 2016, la Agencia de Protección del Medio Ambiente de EUA (EPA), junto con otras agencias relevantes, lanzó un Plan de Acción de Investigación Federal para investigar los riesgos para la salud humana de los gránulos de NFU. Enumeraron más de 200 sustancias, de las cuales 20 tenían una clasificación armonizada como cancerígenas, o tóxicas. Algunos metales y varias otras sustancias que se han encontrado en los gránulos de caucho reciclado también se analizan brevemente en este informe.

La ECHA (Agencia Europea de Químicos) en el 2017 evaluó los riesgos para la salud humana de las sustancias que se encuentran en los césped sintéticos que contiene granulados de NFU's como material de relleno. Se concluye que no se encontró ninguna razón para aconsejar a las personas que no practiquen deportes con tipo de césped sintético. Este consejo se basa en la evaluación de la ECHA de que existe un nivel muy bajo de preocupación por la exposición a sustancias encontradas en dichos granulados [85, p. 66].

#### 4.1.3. La economía circular de los NFU's

La economía circular de los granulados de NFU's comienza con el diseño y desarrollo de neumáticos en donde prime el rendimiento óptimo y longevidad. Los neumáticos usados son recogidos en los lugares de generación (por ejemplo en los talleres mecánicos) o en las zonas de gestión. Tras su transporte, son dirigidos a las respectivas plantas de tratamiento para la clasificación, en donde pueden: dirigirse a los centros de recauchado, reciclado, o finalmente, a los puntos de valorización energética.

Del total de neumáticos que se gestiona en las plantas de tratamiento, de manera general se tiene que el 85 % de todos los neumáticos usados, proceden de coches y camionetas, y un 14 % de camiones pesados. El 1 % restante proviene de motocicletas, aviones, etc. [86].

A continuación se presenta un esquema del ciclo desde el punto de vista del diseño (Ilustración 8):

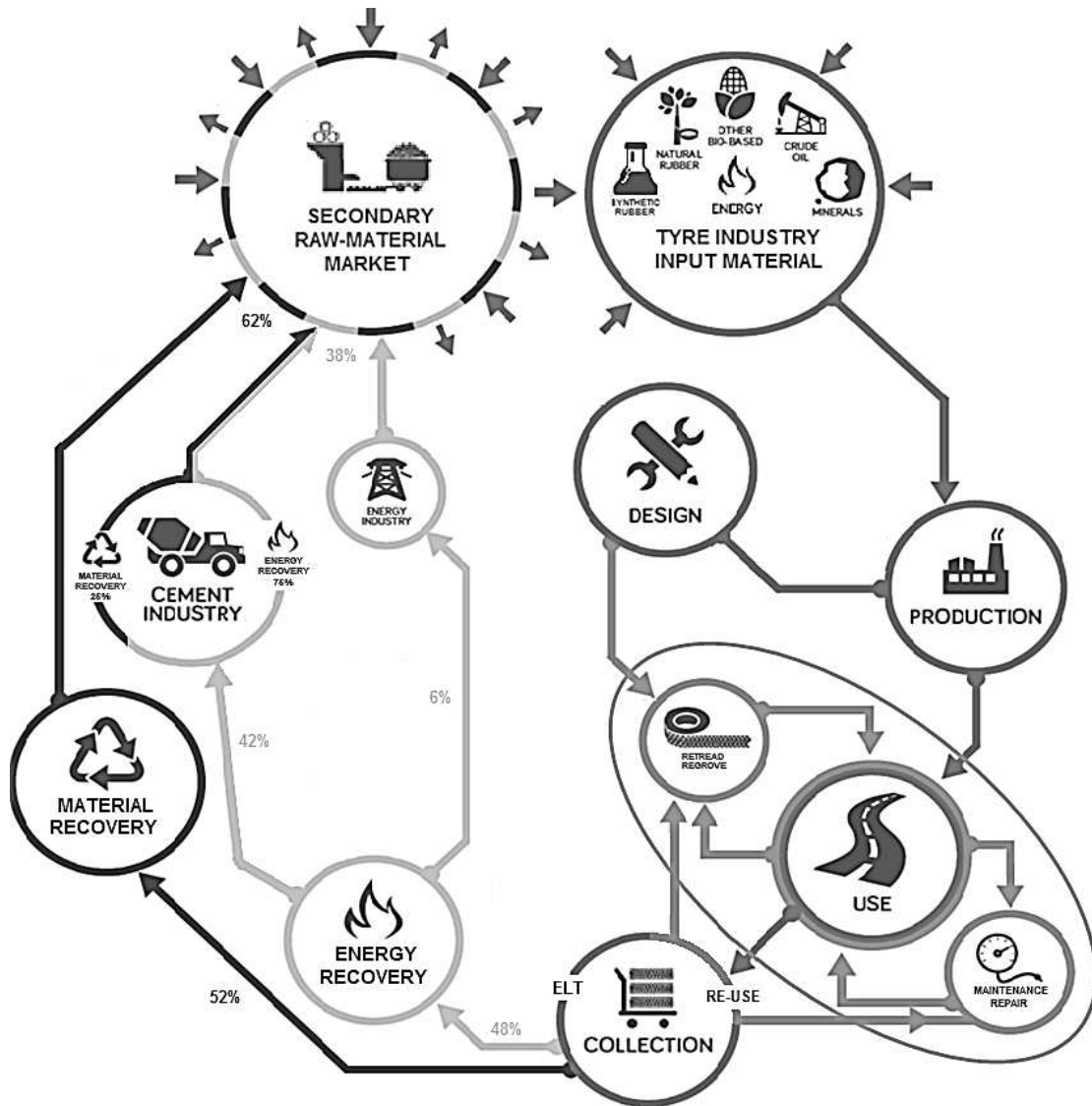


Ilustración 8. "La economía circular desde el diseño de neumáticos". Fuente:[87]

#### 4.1.4. Mercado de los granulados de NFU's

La disminución del aporte público en nuevas infraestructuras (por ejemplo polideportivos, mantenimiento de carreteras de construcción, cancha de públicas, etc.) debido en cierta medida a la recesión económica, han producido una disminución en la demanda de NFU's granulado en los mercados de la UE.

De acuerdo con los datos obtenidos por SIGNUS, en 2020 se recogieron 176.718 toneladas de NFU's [83] de las cuales 83.834 toneladas salieron al mercado. Esta cifra incluye tanto los materiales puestos en el mercado en nuestro país, como los destinados a exportación (13.235 toneladas). De esta cantidad cabe destacar que 42.605 toneladas son granulado de caucho en distintas granulometrías, 26.332 toneladas de acero y 14.895 toneladas de textil. Se ha fijado por el Sistemas Integrados de Gestión (SIG) el valor equivalente al coste de la gestión del tratamiento del residuo. A continuación se presentan las tarifas vigentes durante el 2020 (Ilustración 9).

Categorías	Descripción	Peso (KG)	Precio/Ud
<b>A</b>	Moto, Scooter y Ciclomotor	-	0,70 €
<b>B</b>	Turismo	-	1,18 €
<b>C</b>	Camioneta, 4x4, Todo terreno y SUV	-	1,90 €
<b>D</b>	Camión y Autobús	-	8,80 €
<b>E1</b>	Manutención, Macizo, Quad, Kart, Jardinería y otros	(*) ≤ 5	0,11 €
<b>E2</b>		> 5 y ≤ 25	1,72 €
<b>E3</b>		> 25 y ≤ 50	3,04 €
<b>E4</b>		> 50	11,18 €
<b>F1</b>	Agrícola	< 50	3,42 €
<b>F2</b>		≥ 50 y < 100	9,15 €
<b>F3</b>		≥ 100 y < 200	14,12 €
<b>F4</b>		≥ 200	28,25 €
<b>G1</b>	Obra pública e industrial	< 50	3,14 €
<b>G2</b>		≥ 50 y < 100	11,66 €
<b>G3</b>		≥ 100	45,56 €

*Ilustración 9. Tarifas Ecovalor vigentes 2020. Fuente: [88]*

A nivel nacional, el Real Decreto 1619/2005 [89] sobre la gestión de los NFU's indica que los productores de neumáticos se encargarán del proceso de gestión, en la medida en que se cubran los costes atribuibles a esta tarea. En España, estos costes de gestión están incluidos en el precio de venta final de los neumáticos. En consecuencia, se deduce que los costes atribuibles a la transformación del granulado de los neumáticos ya han sido

asumidos socialmente en comparación con los costes de extracción de los materiales convencionales.

De acuerdo con las plantas operativas nacionalmente, desde sus inicios en 2007, las plantas de reciclado con mayor producción, realizan un tratamiento adecuado a su producción (Ver tabla 4) [90, p. 13]:

*Tabla 4. Plantas de tratamiento y producción NFU's en España.*

<b>PLANTA DE RECICLAJE</b>	<b>CAPACIDAD (T/AÑO)</b>	<b>PRODUCCIÓN DE CAUCHO (T/AÑO)</b>
<i>RMD en Aznalcóllar (Sevilla)</i>	20.000	12.000
<i>RENEAN en Espeluy (Jaén)</i>	15.000	9.000
<i>AMSA (Pont de Vilomara-Barcelona)</i>	15.000	9.000
<i>Andaluza de Reciclajes ASNA</i>	12.000	7.200
<i>Planta de NFU's de Zaragoza</i>	12.000	7.200
<i>Granulados Levantinos de Caucho, en Xirivella (Valencia)</i>	6.000	3.600
<b>TOTAL (t/año)</b>	<b>80.000</b>	<b>48.000</b>

La situación del mercado del NFU's según diferentes autores refleja la falta de opciones que en la actualidad existe para este tipo de residuo industrial (Ver tabla 5).

*Tabla 5. Situación del mercado de NFU's aproximada en España.*

<b>MERCADOS (Anual %)</b>	<b>2004</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2013</b>	<b>2020</b>
	[91]	[68]	[92, p. 10]	[86]	[83]
<b>Reutilización Exportación</b>	-	9,6	-	-	15,7
<b>Reciclado</b>					
-césped artificial	60	53	60	42,7	42,8
-pavimentos de seguridad	11,3		24,7		29,0
-pistas de atletismo	5,0				
<b>Obra Civil</b>					
mezclas bituminosas, otros	5,7	3,5	5,7	5,3	5,2
<b>Recuperación Energética</b>					
hornos	-	14,4	-	52	-
<b>Otros</b>	18	-	9,8	-	7,3
<b>Depósito</b>	-	19,4	-	-	-
<b>TOTAL (ton)</b>	-	258,3	-	121,6	176,7

## 4.2. Características de los neumáticos fuera de uso (NFU's)

### 4.2.1. Nomenclatura de los NFU's

Los suelos tradicionales se suelen clasificar según el rango de tamaño de las partículas presentes en el suelo, generalmente referido de la siguiente manera: arcillas <0,002 mm;

- Caucho 2 - 4 mm: empleado en pavimentos de seguridad y productos moldeados.
- Caucho 2 - 7 mm: empleado en hípica y sacos de boxeo.
- Acero: empleado en chatarrerías y acerías.
- Fibra textil: empleado en valorización energética y aislamiento.

En relación a los procesos de obtención de los granulados de NFU's, Estrada Rivera (2016) [93] señala los siguientes:

- **Termólisis:** corresponde a un sistema en el que se somete a los materiales de residuos de neumáticos a un calentamiento en un ambiente sin oxígeno. Se realiza a altas temperaturas y la ausencia de oxígeno provocan un efecto de destrucción de los enlaces químicos. De este método se obtienen los compuestos originales del neumático, con lo que se puede obtener la recuperación total de los mismos.
- **Trituración mecánica:** Es un proceso mecánico que genera productos limpios de todo tipo de impurezas. Se destaca que la trituración con sistemas mecánicos es usualmente el paso previo en los diferentes métodos de recuperación y reutilización del granulado de NFU's.
- **Trituración criogénica:** Este tratamiento utiliza nitrógeno líquido para enfriar el neumático hasta temperaturas de entre menos 100-150 ° C, cuando el caucho se puede cortar de manera sencilla. Tiene similitud con el proceso mecánico, genera partículas o polvos de tamaños variables según la necesidad que se requiera para el mismo.

El tamaño de las piezas resultantes viene definido por la separación de los ejes. El calibre, tamaño y la distribución de las partículas de los neumáticos triturados pueden ser diferentes, y estos materiales se denominan "Derivados de Neumáticos" (STD) o "Agregados Derivados de Neumáticos" (TDA) (12-305 mm) [94].

De acuerdo con el Comité Europeo de Normalización (CEN) los productos del proceso de trituración de los NFU's se clasifican de acuerdo a su tamaño (CWA 14243/ UNE-EN 14243-1) [95]. El objetivo en este caso es normalizar el mercado de los productos del

reciclado de materiales de los NFU's; como resultado, aparecen cinco tipos diferentes de productos de caucho (véase la tabla 6).

Los sistemas de trituración de caucho se establecen en función de la demanda actual del mercado. Los materiales producidos en las distintas etapas de los procesos de tratamiento, principalmente a través de la reducción de tamaño de los NFU's, pueden clasificarse en gran medida en función de su(s) dimensión(es). Éstas se describen en la norma ASTM D6270-17 [96] y la norma EN 14243 [95]; se presentan en la Tabla 6, mientras que la Ilustración 11 muestra los tamaños de partícula producidos típicamente para aplicaciones de ingeniería civil.

*Tabla 6. Clasificación de los NFU's por tamaño y dimensiones*

<b>PRODUCTO</b>	<b>EUA ASTM D6270-17 [96]</b>	<b>EUROPA CWA 14243 UNE-EN 14243-1 [95]</b>
<i>Neumático entero/ Whole tyre</i>	Sin procesar	Sin procesar
<i>Agregados Derivados de Neumáticos/ Tire Derived Aggregate (TDA)</i>	12-305 mm	---
<i>Cortes</i>	---	≥ 300 mm
<i>Tiras/ Triturado/ Shreds (A)</i>	50 - 305 mm / Mecánica – Reducción a temperatura ambiente	20 mm - 400 mm
<i>Astillas/ viruta/ Chips (B)</i>	12 - 50 mm / Mecánica – Reducción a temperatura ambiente	10 mm - 50 mm
<i>Granulado/ Granulated rubber (C)</i>	425 µm (40 malla) 0,425 mm - 12 mm	0,8 mm - 20 mm
<i>Polvo/ Powdered rubber (D)</i>	< 425 µm (40 malla) 0,425 mm	< 0,8 mm



limos 0,002-0,06 mm; arenas 0,06-2,00 mm; gravas 2,0-60,0 mm. Sin embargo, los granulados de caucho se clasifican por el proceso de trituración de los NFU's. Existen diferentes métodos para su obtención. El método más utilizado es el mecánico, que consiste en realizar continuos procesos de trituración a partir de molinos y clasificados hasta llegar al tamaño de partícula deseado, así como la separación de las fibras textiles y piezas metálicas [67].

Se puede afirmar que el sistema más completo de reducción mecánica de tamaño es el granulado. Se produce a partir del troceado de los NFU's entre 50 y 300 mm, seguidamente, además de reducir el material a tamaños entre 5 y 25 mm, se separan magnéticamente los elementos metálicos, posteriormente el material puede someterse a reducciones de tamaño según las especificaciones del cliente final: 0-0,5 mm, 0,5-2 mm, 2-7 mm, 7-15 mm (Ver ilustración 10). En esta investigación se parte de las granulometrías que se suelen ofertar para el conjunto de aplicaciones ya implementadas en el mercado.

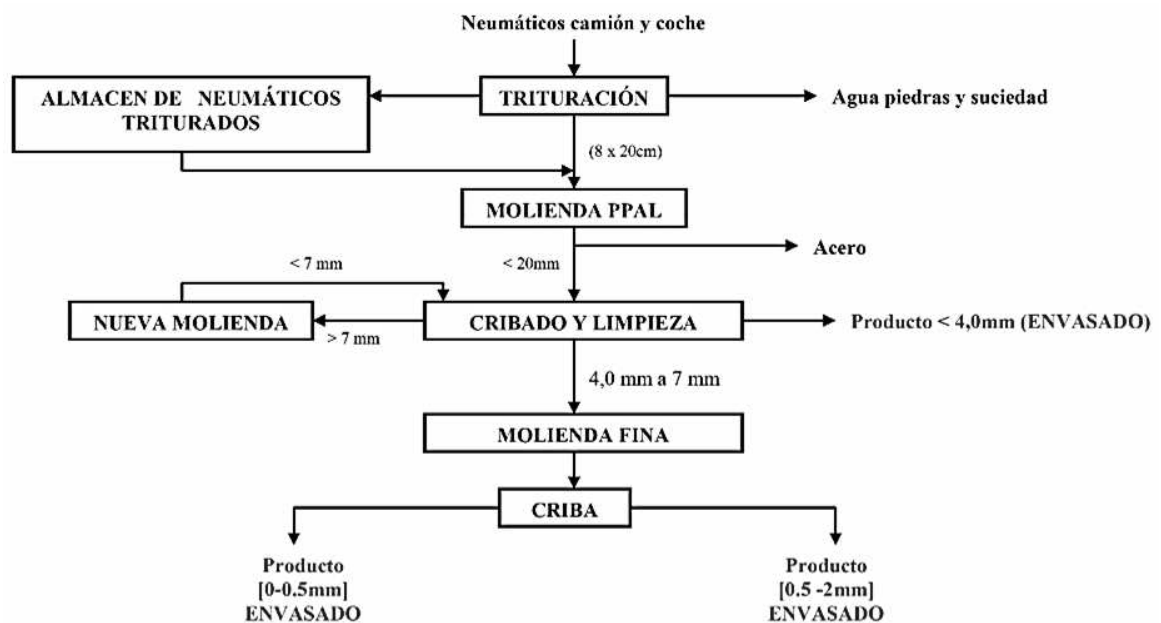


Ilustración 10. Esquema del proceso granulado del NFU's. Fuente: [68].

De acuerdo con las especificaciones de uso de los diferentes tamaños de caucho triturado, así como acero y fibras, se puede tener la siguiente clasificación [28]:

- Caucho 0,0 – 0,6 mm: empleado en asfaltos y mezclas bituminosas.
- Caucho 0,6 - 2 mm: empleado en campos de césped artificial.



*Ilustración 11. Ejemplos de piezas de NFU's, muestras RENEAN y RMD.*

Dado el limitado número de investigaciones que utilizan partículas de caucho de diámetro inferior a 12 mm, esta investigación se centra en el estudio de las propiedades de esta clase de material, clasificado como caucho granulado (C). Es importante destacar que se ha evaluado la franja granulométrica que no contiene acero embebido en el caucho, evitando así los posibles problemas de oxidación.

#### 4.2.2. Principales componentes de los NFU's

Los porcentajes de material del cual están compuestos los NFU's atienden al tipo de vehículo para el que están destinados. La composición y características varían de un tipo neumático a otro e incluso dentro de un mismo tipo, pueden existir enormes diferencias [77, p. 16]. Haciendo un esquema de los elementos que conforman un neumático, la tabla 7 muestra la composición media de los principales tipos de neumáticos, acompañada de los valores reflejados en la norma UNE-CEN/TS 17045:2020 [97].

Tabla 7. Composición media de los principales tipos de neumáticos (%). Fuente: [77, p. 18], [97].

<b>TIPO DE NEUMÁTICO</b>	<b>CAUCHO (%)</b>	<b>ACERO (%)</b>	<b>TEXTIL (%)</b>
<i>Turismo</i>	78 - 79%	16-16,5%	5-5,5%
<i>Camión</i>	73-75%	25-26.5%	0,5 < 1%
<i>Industriales (Obra Civil)</i>	86%	11%	3%
<i>Agrícola</i>	80%	3%	17%

La producción de neumáticos turísticos y camiones lidera los porcentajes de producción. A continuación se enlista una distribución aproximada de los principales materiales empleados en la fabricación de neumáticos, tanto de turismo como de camión (ver tabla 8).

Tabla 8. Principales componentes de los NFU's. Fuente: [98].

<b>MATERIAL</b>	<b>NEUMÁTICO TURISTICO</b>	<b>NEUMÁTICO CAMIÓN</b>
<i>Caucho (30 sintéticos, 8 naturales)</i>	48%	45%
<i>Negro de carbón (8 tipos) y sílice</i>	22%	22%
<i>Metal</i>	15%	25%
<i>Textil (Fibra de poliéster y nylon)</i>	5%	-
<i>Óxido de zinc</i>	1%	2%
<i>Azufre</i>	1%	1%
<i>Aditivos (40 productos químicos diferentes, como ceras, aceites, pigmentos, sílices y arcillas.</i>	8%	5%

En los neumáticos de turismo el contenido de caucho natural es del orden del 65% del caucho total, mientras que en los de camión es del 72% aproximadamente [98]. En cuanto a las sustancias peligrosas, un neumático contiene aproximadamente un 1,5% en peso de compuestos peligrosos como Cadmio (Cd), compuestos Zinc (Zn), cobre (Cu) o plomo (Pb), soluciones ácidas o ácidos en forma sólida y compuestos órgano halogenados [77].

#### 4.2.3. Estructura de un neumático

Un neumático está compuesto de numerosos elementos, cuya disposición de orden descendente se enlista a continuación: banda de rodadura, cinturones, carcasa, aro de talón, revestimiento interior y flanco [77]. Sus principales características se muestran en la Ilustración 12.

De acuerdo con las propiedades de la banda de rodamiento (rodadura) se le exigen dos características principales: elevada resistencia a la abrasión y buen funcionamiento en relación al agarre los pavimentos, tanto secos como húmedos.

**Banda de rodadura:** mezclas de gomas adherentes, muy resistentes a la fricción y al desgaste; provee la tracción.



**Aro de talón:** de acero inextensible, se fija y se ajusta a la llanta.



**Revestimiento interior:** espacio estanco que retiene el aire comprimido; de caucho sintético.



**Carcasa:** estructura flexible de hilos textiles o de acero embutidos en goma; sobre ella se colocan el resto de lonas y capas de goma que lo conforman.



**Flanco:** soporta la carga y las flexiones mecánicas; resiste los roces e impactos; dota de estabilidad.



**Cinturones:** proporcionan estabilidad y rigidez a la banda de rodadura; son flexibles para absorber los obstáculos y están constituidos por cables metálicos.



Ilustración 12. Características de los elementos de un neumático. Fuente: [77, p. 18]

#### 4.2.4. Propiedades físicas NFU's

La curva granulométrica de los NFU's tiende a la uniformidad por el correspondiente proceso de trituración. Se observan porcentajes altos de un solo tamaño de partícula, llegando a tener hasta el 90% de un solo tamaño [69, p. 89]. Para tamaños de gran magnitud (Astillas – Chips 12-50 mm) el proceso de trituración produce piezas planas y de formas irregulares [99, p. 20]. En los estudios de Susanna Valls (2014) [100, p. 59] se observó a partir de la prueba de la lupa binocular, que las partículas de caucho finas y gruesas (0,425 mm - 12 mm) tienen una superficie angular derivada de la trituración

mecánica a la que son sometidas. Se observaron restos de fibras textiles adheridas en algunas partículas de caucho en las partículas de 0,6-2mm (aumentos 15x).

La característica de la absorción que se relaciona con el tamaño de la partícula, tiene un comportamiento similar al de áridos convencionales. Las muestras con tamaño nominal pequeño (menores a 4 mm) su absorción aumenta de 0,55 a 1,45%, un hecho que podría ser debido a su mayor superficie específica. Se han obtenido valores de absorción de agua entre 3% y 7 % (en peso) en investigaciones estudiadas [91]. Humphrey y otros (1992), encontraron que la absorción de agua para tres muestras de NFU's troceados, usando el método AASHTO T 85-85, y obtuvo valores entre 2 y 4,3%. En las investigaciones de Pierce, C (2003) [101] se obtuvieron valores de absorción equivalente al 2,4% de su peso en condiciones de superficie seca saturada. Esta capacidad de absorción es relativamente alta en comparación con la arena, que normalmente tiene una capacidad de absorción del 0,5% o menos [101].

En las investigaciones de Karla Andreina (2011) se muestra que en las granulometrías de NFU's (2-0,25mm), se obtienen valores elevados de absorción, del orden del 11% hasta algunos casos el 50 % [69, p. 89]. Estos valores se encuentran muy por encima de la media de investigaciones anteriores.

Los valores de gravedad específica de las astillas-chips (12-50 mm) presentan valores alrededor de 1,08 ~ 1,44 t/m<sup>3</sup> [91], [102, p. 37]. En general, los granulados de NFU's presentan valores considerablemente más bajos que los áridos minerales comunes, por ejemplo, 2,60 a 2,80 t/m<sup>3</sup> [100], [103].

La densidad de una pieza individual de NFU's está comprendida entre 1,15 y 1,45 t/m<sup>3</sup> [99], [104] mientras que para el granulado se tienen valores entre 0,40 y 0,60 t/m<sup>3</sup>; rango comprendido entre 0,42 y 0,99 t/m<sup>3</sup>; 0,63 y 0,84 t/m<sup>3</sup> compactada [80], [91] independientemente del tamaño de partícula [105]. Se ha observado que las muestras con mayor cantidad de acero suelto y/o embebido, tienen un peso específico y densidad aparente mayor que las que no contienen acero o solamente poseen textil [80], así como con la disposición de los trozos para D50 (deja pasar el 50%) > 36mm, encontrándose del orden de un tercio a un medio de la densidad seca aparente de suelos convencionales.

De esta manera los NFU's indican un potencial material de relleno con peso propio muy ligero [91].

En relación a las propiedades hidráulicas que debe tenerse en cuenta al determinar la idoneidad de un material para su uso en sistemas de drenaje, la caracterización hidráulica de los gránulos NFU's se centra en la permeabilidad del residuo. Para esta propiedad, que se relaciona con el contenido inicial de humedad y la capacidad de absorción, los granulados de NFU's cuentan con una permeabilidad elevada, asimilable a la correspondiente a las arenas finas, con coeficientes de permeabilidad en torno a  $5 \times 10^{-2}$  cm/s [91], [106]. Los estudios de Carlos Hidalgo (2017) muestran valores de  $7 \times 10^{-3}$  cm/s [81]. CEDEX (2013) [106] indicando que el índice de poros se puede considerar similar a la de una grava limpia, en torno a 1,5 y 15 cm/s. Las piezas con un tamaño de poro más grande, facilitan la permeabilidad y producen una mayor conductividad hidráulica. Las virutas de neumáticos (12-50 mm) tienen una alta conductividad hidráulica como la grava, aproximadamente  $10^{-1}$  cm/s [102].

#### 4.2.5. Propiedades mecánicas NFU's

Las propiedades mecánicas de los granulados de NFU's se centran en dos de los aspectos más relevantes del residuo: la compresibilidad y la resistencia al corte. Estas propiedades se encuentran vinculadas a la alta elasticidad, elevada resistencia al corte, resistencia a la acción del moho, calor, humedad, luz solar y rayos ultravioletas.

Los ángulos de fricción interna de los TDA (12-305 mm) varían entre  $6^\circ$  y  $60^\circ$ , mientras que los intermedios de cohesión oscilan entre 0 y 82 kPa [107].

El contenido óptimo de agua de las mezclas con arcilla o limo y virutas de NFU's se mantiene constante a medida que aumenta el contenido de virutas de neumáticos usados. Los NFU's son difícilmente compactables, debido a su morfología tórica y elasticidad. Se ha detectado que el tamaño de las partículas no afecta a los parámetros de cohesión, ángulos de rozamiento y módulos de deformabilidad, siempre que se encuentren dentro del rango 25-100 mm. [99, p. 21]. Sin embargo, el tamaño de las partículas de NFU's tiene un efecto importante en la respuesta mecánica de las mezclas

que puede dar como resultado una disminución de la resistencia y un módulo de corte máximo [41].

La compresibilidad del caucho puro es notablemente más alta que la de los áridos convencionales, lo que puede debilitar la capacidad de servicio de las estructuras geotécnicas [103]. De acuerdo a los ensayos de compresibilidad realizados en laboratorio [91], sus resultados arrojaron un módulo de deformación mucho menor al habitual de suelos convencionales. Las deformaciones más relevantes se generan en la fase inicial de asentamientos, indicando una compactación inicial del residuo, que evita este tipo de patologías.

La relación de Poisson de los TDA varía entre 0,17 y 0,45 y el módulo de Young entre 0,77 y 1,25 MPa [108]. Estos valores aumentan con el aumento de la presión de confinamiento. La resistencia al cizallamiento máxima sólo se puede alcanzar a partir del 20% del desplazamiento total [102]. En los estudios de Susanna Valls (2014) [100, p. 66] se visualizó un descenso del módulo elástico de las probetas que contienen NFU's en comparación con la probeta de referencia. Se estima que independientemente del tipo de NFU's, se observa que al aumentar la dosificación de NFU's se reduce el módulo elástico. De ahí que se genere una correlación directa entre el módulo elástico y la resistencia a compresión, ambos decrecen al aumentar los porcentajes de NFU's en las muestras. Sin embargo, en porcentajes inferiores al 20% en adición, las partículas de NFU's mejoran las características de deformación elástica de suelos con problemas de hinchamiento, reduce sensiblemente el hinchamiento [109] y el suelo muestra una mejora en la resistencia a la compresión [110].

Algunas investigaciones sugieren que son posibles aumentos leves en la resistencia con la incorporación de caucho en suelos arenosos / arcillosos hasta un nivel óptimo. Sin embargo, Mohajeran et al. (2020) [105] afirman que no se puede generalizar, ya que cada uno de los experimentos parten de parámetros muy diferentes (tipo de suelo, tipo de caucho, tamaño de partícula de caucho y porcentaje de contenido de caucho), los cuales tienen una gran influencia en el comportamiento del material. La variabilidad de los parámetros del suelo hace que generalizar los resultados de este tipo de estudios sea muy difícil.

Los estudios [100] que comparaban el efecto de la adición de partículas finas y gruesas de NFU's coinciden en que las gruesas generan una reducción mayor en las propiedades mecánicas del hormigón fabricado con dichos granulados.

El índice de compresibilidad (Cc) sigue siendo similar al del suelo convencional cuando el contenido de caucho es inferior al 15%. Para un mayor contenido de NFU's, este índice aumenta drásticamente, mostrando que un mayor contenido de NFU's conduciría a un suelo con alta compresibilidad [109].

De acuerdo con los resultados de Suat Akbulut et al. (2017) [111] en donde se realizaron investigaciones del efecto del caucho y fibras sintéticas sobre los parámetros de resistencia al cizallamiento, las pruebas de caja de corte mostraron que los valores de cohesión y ángulo de fricción interna aumentaron por la adición de caucho de neumáticos. Los valores máximos de cohesión de las muestras reforzadas se observaron para trozos de 30 mm como 219 kPa, que es 1,2 veces más que el de las muestras no reforzadas.

En los estudios de Carlos Hidalgo (2016) [112] los resultados muestran que el módulo resiliente (Mr) tiende a disminuir a medida que aumenta el contenido de caucho en mezclas con arena. Esto podría dar lugar a mezclas inestables que experimentan grandes deformaciones después de un pequeño número de ciclos de carga.

#### 4.2.6. Propiedades químicas NFU's

Podemos atribuir que las características químicas que guardan los granulados de NFU's dependen en gran parte de la composición del elemento. En la mayoría de los casos, se puede señalar que el caucho bruto se mezcla con numerosas sustancias que modifican sus características para la generación de un neumático. De estas sustancias se pueden señalar el carbonato de calcio y la baritina o sulfato de bario, además de otros aditivos reforzantes que también se añaden para dar dureza al producto final, como el negro de humo, óxido de zinc, carbonato de magnesio y ciertas arcillas. [91, p. 11].

En relación al contenido de minerales, los principales son: el óxido de zinc, el azufre y el negro de carbono (20-30% en combustión incompleta de hidrocarburos) y otros



compuestos metálicos como antioxidante y antiozono. Se indica que el negro de carbono reduce el envejecimiento del polvo de neumáticos en ligantes bituminosos [99, p. 19].

En general, se puede decir que los TDA's tienen una alta durabilidad. Sin embargo, las fibras de acero pueden corroerse con efectos peligrosos para el medio ambiente [102]. El lixiviado de metales pesados, particularmente zinc, es la principal preocupación cuando se consideran los NFU's para su reutilización [105]. Los resultados del conjunto de las muestras evaluadas señalan que los lixiviados de NFU's contienen unos niveles bajos (inferiores a los mínimos para consumo humano) de compuestos orgánicos volátiles y de metales pesados, a excepción de hierro y manganeso. También se indica que el hierro, el manganeso y el zinc procede de los alambres metálicos expuestos, por lo que resulta importante asegurarse de minimizar la cantidad de alambres no embebidos en el caucho [91].

En relación con las propiedades intrínsecas del NFU's que afectan en el momento de implementarlo, existen numerosos estudios de caracterización de la lixiviación procedente de NFU's. Los indicadores que pueden intervenir en la tasa de lixiviación y/o la concentración de compuestos en los lixiviados de neumáticos en el suelo, las aguas subterráneas y las aguas superficiales son los siguientes [77]:

- Tamaño del neumático: la lixiviación de neumáticos enteros es probable que sea más lenta que la producida a partir de astillas o tiras de neumáticos, debido a la diferencia en la relación entre superficie y volumen.
- Cantidad de acero expuesto: si el acero está expuesto es probable que la lixiviación de magnesio (Mn) y Hierro (Fe) sea más rápida que en neumáticos enteros.
- La exposición al ambiente químico: es probable que la lixiviación de los metales sea más rápida en condiciones ácidas, mientras que la lixiviación de compuestos orgánicos sea más rápida en condiciones básicas.
- La permeabilidad del suelo: la infiltración/percolación es más rápida en suelos permeables.

Las investigaciones de Rodríguez-Abad (2010) [104] encontraron que las pruebas químicas sugieren que los lixiviados de TDA no causan ningún impacto ambiental relevante. Se puede decir que de los resultados obtenidos en ensayos químicos de lixiviación se concluye que el empleo de NFU's como material de relleno viario es perfectamente posible desde el punto de vista medioambiental. Los valores de agua filtrante presentan unas concentraciones de contaminantes generalmente muy inferiores a las estipuladas en el R.D. 140/2003, referente a la calidad del agua para consumo humano [99, p. 21].

En cuanto a las propiedades térmicas, el valor calorífico neto de un neumático entero es de entre 26 y 34 GJ/t, valor similar al de las fuentes de combustible comunes. Un neumático es difícil que sea el inicio de un proceso de combustión, su ignición se realiza a los 650°C, produciendo principalmente CO<sub>2</sub>, agua y residuos como cenizas y otros desechos sin quemar [77, p. 19]. El factor de mayor relevancia en la reproducción de calor y riesgo de autocombustión de los NFU's es la concentración inicial de acero, por lo que se recomienda especial atención al proceso de trituración del residuo, separación y mantenimiento de las máquinas trituradoras [91].

## **5. MARCO NORMATIVO Y GESTIÓN DE LOS MATERIALES RECICLADOS**

El desarrollo de normas y especificaciones técnicas es de gran importancia para definir metodologías que permitan consolidar y fortalecer el uso de materiales reciclados, asegurando su calidad y seguridad dentro del marco de la economía circular.

Es importante destacar que uno de los problemas que obstaculiza el desarrollo de estas tecnologías en la UE es la ausencia de procedimientos y manuales de diseño que permitan establecer las pautas para su buena gestión y colocación [113]. Actualmente en España, no existen normas que regulen los granulados de NFU's para sus diferentes aplicaciones, siendo una de las principales razones por las que su empleo en obras de geotecnia no está tan extendido como ocurre con otros materiales. Mientras que en EUA existe desde 1998 la norma ASTM D 6270 ("Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications") que proporciona orientación en relación al uso de estos materiales en ingeniería civil.

El fomento de estándares de calidad para materiales derivados de NFU's, junto con la mejora del rendimiento en el reciclaje y recuperación, son un gran paso hacia la obtención de productos que satisfagan las prestaciones requeridas para su implementación. Además de que contribuye al aumento significativo de nuevos mercados, promoviendo intercambios de tecnología y el acceso a conocimientos, innovación y protección del medio ambiente.

En este capítulo se realiza una revisión exhaustiva de la legislación reciente de la UE al respecto, así como de los enfoques organizativos para abordar los materiales reciclados y la gestión de residuos industriales. Se identifican también los posibles marcos normativos que ayuden a establecer los pliegos técnicos para posibles aplicaciones, así como el estudio de normativa específica de materiales no convencionales, como la arcilla expandida, como ejemplo comparativo.

## 5.1. Granulados de NFU's como residuo

### 5.1.1. Gestión de NFU's

En Europa coexisten tres modelos de gestión para los neumáticos usados (ver Ilustración 13): responsabilidad de productor regulada por Decreto (el más extendido), libre mercado y sistema de tasas gubernamentales [87]:

- **Responsabilidad Extendida del Productor (EPR):** El fabricante tiene la obligación de garantizar que los desechos se eliminen de manera responsable y respetuosa con el medio ambiente. Esto ha llevado a la creación de compañías sin ánimo de lucro financiadas por productores de neumáticos con el objetivo de gestionar la recolección y recuperación de NFU's a través de las soluciones más económicas. Estas empresas tienen la obligación de informar a las autoridades nacionales para generar una trazabilidad clara y confiable.
- **Sistema de libre mercado:** Según este sistema, la legislación establece los objetivos que deben cumplirse, pero no designa a los responsables. De esta forma, todos los operadores de la cadena de recuperación se manejan en condiciones de libre mercado y actúan de conformidad con la legislación. Esto puede estar respaldado por la cooperación voluntaria entre empresas para

promover las mejores prácticas. Los sistemas de libre mercado operan en Austria, Suiza, Alemania y Reino Unido. En Reino Unido opera un sistema de "mercado libre administrado," que implica que los recolectores de NFU's y los operadores de tratamiento deben informar a las autoridades nacionales.

- **Sistema fiscal:** Según el sistema tributario, cada país es responsable de la gestión de los NFU's. Se financia mediante un impuesto que grava a los productores de neumáticos y posteriormente se transfiere al consumidor. Este sistema es aplicado en Dinamarca y Croacia.

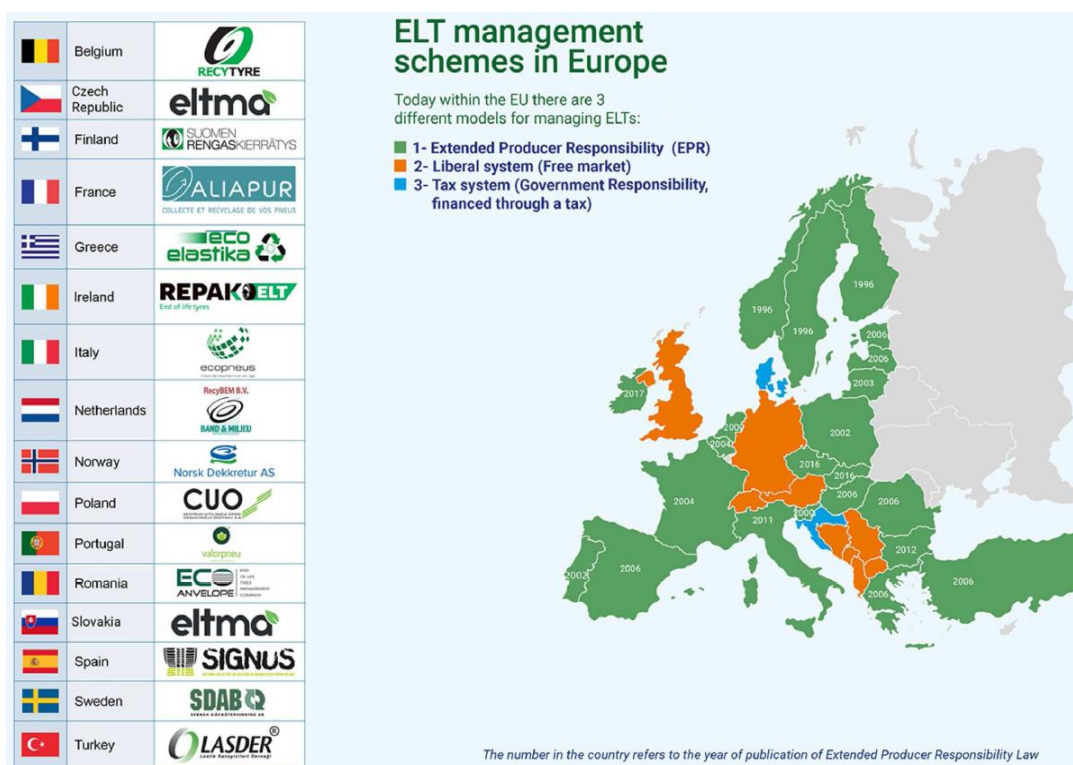


Ilustración 13. Sistemas de gestión de NFU's a nivel europeo. Fuente: [87]

En la actualidad existen 19 países con un modelo de responsabilidad del productor y 14 con un modelo de libre mercado. Se establece por parte de los fabricantes en el sistema de gestión de los NFU's [86]. A partir de las siguientes directivas de la CE, se establecieron los plazos máximos para la solución del problema del vertido de los neumáticos enteros y de los troceados:

- Directiva del Consejo 1999/31/CE, relativa al vertido de residuos.
- Directiva 2.000/53/CE, relativa a los vehículos al final de su vida útil.
- Directiva 2.000/76/CE, relativa a la incineración de residuos.

La Directiva 99/31/CE del Consejo de la UE sobre vertido de residuos, hace algunas menciones explícitas a los NFU's, estableciendo la prohibición del vertido de NFU's enteros desde el 16 de julio de 2003, y del vertido total de NFU's desde el 16 de julio de 2006. [106, p. 25]. De esta normativa se dedujo el derecho interno español a través del Real Decreto 1481/2001 de 27 de diciembre.

La Directiva ELT (2000/53/CE) [114] se encarga de la gestión de los NFU's en la UE. Dentro de su normativa, indica la recogida selectiva de neumáticos para su correcta gestión. La directiva fomenta el reciclaje y, en los últimos años, ha introducido cambios drásticos para hacer más sostenible la gestión de los residuos de neumáticos.

El control que se tiene una vez finalizada la vida útil de los neumáticos, es un proceso ampliamente estudiado y resuelto mediante las diferentes directivas que se han impulsado y puesto en marcha. En España se han constituido de acuerdo con la Directiva 99/31/CE dos Sistemas Integrados de Gestión (SIG):

- Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados (SIGNUS), creado en el 2005, constituido en su mayoría por fabricantes de neumáticos del mercado nacional.
- Tratamiento de Neumáticos Usados (TNU), constituido en el 2006 y en el que participan gran parte de los importadores de neumáticos.

En su conjunto, SIGNUS y TNU conforman el 85% del mercado nacional de NFU's, encargándose de gestionar sin ánimo de lucro y de forma correcta la recogida gratuita de NFU's [106, p. 25]. Su prioridad es realizar la mayor recuperación para su reutilización, además de un correcto transporte a los centros de gestión [99, p. 18].

#### 5.1.2. Marco normativo nacional de los NFU's

La Ley 10/1998 de residuos fue el primer texto legislativo español para la gestión y tratamiento de residuos. A partir de dicha Ley, se establece el trabajo en conjunto del Ministerio de Medio Ambiente y las Comunidades Autónomas para la recopilación de la información y elaboración de las estadísticas sobre neumáticos y NFU's. A continuación

se describen los principales lineamientos establecidos en los diferentes planes de actuación:

### **Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso (PNNFU) 2001-2006**

En el Consejo de Ministros de 5 de Octubre de 2001 se aprobó el Plan Nacional de NFU's (PNNFU) 2001-2006. Este plan estableció como obligatoria la gestión de los mismos aplicando el principio de jerarquía definido en la Ley 10/1998 en los siguientes puntos:

- Planes empresariales de prevención de NFU's.
- Obligaciones del productor de neumáticos.
- Obligaciones de los generadores y poseedores de NFU's.
- Obligaciones de los gestores de NFU's.
- Almacenamiento y eliminación de NFU's.
- Sistemas integrados de gestión de NFU's.
- Financiación de los sistemas integrados de gestión.

### **Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015**

Este segundo plan resume los resultados del primer PNNFU y establece:

- Los principios básicos de gestión: principio de prevención, principio de jerarquía.
- Las responsabilidades del productor.
- Las mejoras técnicas disponibles en la fabricación de neumáticos, de manera que se facilite su recauchutado y su reciclado.
- Nuevos objetivos ecológicos para el período del plan.

### **Programa Estatal Marco de Residuos PEMAR (2016-2020)**

A partir de este programa se establecen las siguientes metas:

- Implantar el principio de la jerarquía de gestión de residuos.
- Alcanzar un 70% del peso de los residuos en reciclaje y valorización en el año 2020, sin incluir las tierras.

- Incorporar el concepto de fin de condición de residuo.
- Establecer el registro único de producción y gestión.
- Fomentar la producción de materiales reciclados de alta calidad.
- Promover el uso de los áridos reciclados para alcanzar un 5% en obras públicas.

### **Plan de gestión de NFU's (2017-2024)**

Los objetivos primarios del Plan asumen como propios los objetivos cuantitativos recogidos en el PEMAR. En dicho Plan, los porcentajes objetivo a cumplir en el año 2020 en relación con el reciclaje y la valorización energética, son del 45% como mínimo para el reciclaje (frente al 55% establecido para el año 2015 en el PNIR), y del 40% como máximo para la valorización energética (frente al 20% establecido para el año 2015 en el PNIR).

Por otra parte, se establecen también como objetivos los siguientes:

- Reducir la generación de neumáticos fuera de uso.
- Mejorar el tratamiento de los NFU's.
- Eliminación de los puntos de acopio de neumáticos abandonados inventariados.

### **Programas en materia de residuos de NFU's por comunidades**

Dentro del ámbito autonómico, cuatro comunidades han desarrollado normas específicas (Castilla y León; País Vasco, Valencia y Aragón). Algunas Comunidades Autónomas han desarrollado además programas concretos de gestión de NFU's enmarcados en planes de residuos de mayor alcance.

En la Tabla 9, se presentan las comunidades que cuentan con programas específicos para NFU's, en el Plan Director Territorial y en su Plan de Gestión [86].

Tabla 9. Programas en materia de residuos para NFU's por comunidades.

COMUNIDAD	PROGRAMA ESPECÍFICO PARA NFU's
ANDALUCIA	Apartado 9.3.7. Neumáticos; Residuos específicos; Plan Director Territorial de Gestión de Residuos Urbanos.
ARAGON (La valorización y la eliminación son servicio público)	Plan de gestión integral de residuos de Aragón 2009-2015: 1. Minimización 2. Reutilización 3. Valorización material de todos los NFU's generados en Aragón en una planta del servicio público (concesión) 4. Impulso empleo polvo de caucho en obra pública.
ASTURIAS	Plan Básico de Gestión de Residuos en Asturias. Apartado 2.2.3.
BALEARES	Plan Director Sectorial para la Gestión de los RCD's, voluminosos y NFU's de la isla de Mallorca (aprobado el 8-4-2002) Aprobado por el Consell Insular de Mallorca el 22 de abril de 2002 (BOIB nº 59, de 16/05/2002).
C.A.CASTILLA LA MANCHA	Plan de Gestión de RU de CLM. Programa de Residuos Urbanos Especiales (RUE). Subprograma de NFU's
CATALUÑA	Programa de Gestión de los Residuos Industriales de Cataluña (PROGRIC), según objetivos anteriores descritos dentro del marco general de residuos industriales, y en base a la normativa vigente.
C. VALENCIANA	Decreto 7/1/2003 Aprueba el Reglamento de producción, posesión y gestión de los NFU's en la Comunidad Valenciana.



## 5.2. *Granulados de NFU's y sus posibles aplicaciones*

### 5.2.1. CWA 14243-2002 POST - CONSUMER TYRE MATERIALS AND APPLICATIONS (Post-consumo de neumáticos, materiales y aplicaciones)

En Europa, la Asociación Europea de Reciclaje de Neumáticos (ETRA) ha sido la encargada de la creación de normativa relacionada con la industria del reciclaje de neumáticos y su post-consumo. CWA se divide en dos partes. La parte 1 se refiere a la producción de materiales de neumáticos post-consumo y la parte 2 es un manual de orientación que ofrece información más detallada sobre las posibles aplicaciones de los diferentes productos procesados.

Recientemente se han publicado normas relativas a la gestión y control de calidad de los procesos de producción, con el fin de obtener estándares que beneficien la seguridad de utilización. El comité CEN/TC 366 RECICLAJE DE NEUMÁTICOS es el encargado de estandarizar los materiales producidos a partir del tratamiento de NFU's (cortes, triturados, astillas, granulados, polvos, aceros, textiles), desarrollando estándares para ciertas características físicas de los materiales producidos a partir de ELT's. A continuación se enlistan las normativas representativas del tema de estudio (Tabla 10):

*Tabla 10. Normas relativas a la gestión y control de calidad de los NFU's.*

<b>CÓDIGO</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>INFORMACIÓN GENERAL</b>
<i>CEN / TS 17045: 2020</i>	Materiales obtenidos de NFU's. Criterios de calidad para la selección de neumáticos enteros, para procesos de recuperación y reciclaje.	Este documento proporciona criterios para clasificar los NFU's en diferentes clases según las categorías. También proporciona criterios para la determinación de su idoneidad para su uso en procesos de reciclaje y recuperación de materiales.
<i>EN 14243-1:2019</i>	Materiales obtenidos a partir de NFU's. Parte 1: Definiciones generales relativas a los métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas.	Este documento proporciona definiciones generales para la recolección de muestras y la preparación de una muestra representativa basada en un plan de muestreo con el fin de determinar las dimensiones y las impurezas.
<i>EN 14243-2:2019</i>	Materiales obtenidos a partir de NFU's. Parte 2: Granulados y polvos. Métodos para determinar sus dimensiones e impurezas, incluyendo acero libre y contenido textil libre.	Esta norma proporciona métodos de prueba para la determinación de la distribución del tamaño de partículas de granulados y polvos, producidos a partir de todas las categorías de NFU's en todas las etapas de los procesos de tratamiento, así como para la determinación de impurezas (incluido el acero libre, el acero libre y contenido textil).
<i>EN 14243-3:2019</i>	Materiales obtenidos a partir de NFU's. Parte 3: Triturados, cortes y chips. Métodos para determinar su(s) dimensión(es) incluyendo las dimensiones de los filamentos salientes.	Este documento proporciona métodos de prueba para la determinación de la (s) dimensión (es) de jirones, cortes y astillas (incluidos los filamentos que sobresalen) producidos a partir de todas las categorías de NFU's en todas las etapas de los procesos de tratamiento.
<i>CEN / TS 17189: 2018</i>	Materiales obtenidos de NFU's: Determinación de la densidad real de granulados - Método basado en picnometría de agua	---
<i>CEN / TS 17188: 2018</i>	Materiales obtenidos de NFU's: Método de muestreo para granulados y polvos almacenados en big-bags	Este documento especifica un método para obtener una muestra de caucho granulado o en polvo derivado de NFU's que han sido almacenados en big-bags.
<i>CEN / TS 16916: 2016</i>	Materiales obtenidos de NFU's: determinación de requisitos específicos para el muestreo y determinación del contenido de humedad mediante el método de secado en horno.	Este borrador de Especificación Técnica especifica un método para determinar el contenido de humedad total de los materiales obtenidos de los NFU's secando las muestras en un horno. El método es aplicable a virutas, granulados, polvos y textiles derivados del tratamiento de NFU's.
<i>CEN/TS 17307:2019</i>	Materiales obtenidos a partir de NFU's. Granulados y polvo. Identificación de elastómeros.	Este documento especifica la detección de productos de pirólisis en solución mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas.
<i>CEN/TS 17308: 2019</i>	Materiales obtenidos a partir de NFU's. Filamentos de acero.	Este documento especifica la determinación del contenido no-metálico.

5.2.2. ASTM D6270-17 STANDARD PRACTICE FOR USE OF SCRAP TIRES IN CIVIL ENGINEERING APPLICATIONS (práctica estándar para el uso de neumáticos de desecho en aplicaciones de ingeniería civil).

Desde los años 70, en EUA se han implementado obras de relleno con NFU's. La experiencia acumulada en este campo permitió desarrollar una normativa específica como la ASTM D6270-98, que define procedimientos de ensayos de NFU's en laboratorio y recomendaciones prácticas para su puesta en obra. Está destinada al uso de neumáticos de desecho (enteros, trozos, virutas, jirones, mezclas con tierra) en aplicaciones de ingeniería civil.

Tiene una base empírica de más de 70 puestas en marcha. Las prescripciones de ASTM, reflejadas por el departamento de transporte de EUA [108] se enfocan en evitar el riesgo de autocombustión. Algunas de ellas son las siguientes:

- No construir espesores mayores a tres metros de NFU's troceados.
- Limitar la cantidad de acero, tanto el suelto como el embebido en el caucho.
- Limitar la cantidad de partículas finas de NFU's troceados.
- Evitar o reducir la circulación de aire y agua en el interior del relleno.
- Las partículas de NFU's troceados deben estar libres de contaminantes que pudieran crear riesgo de incendios (grasas, aceites, combustibles).

5.2.3. UNE-EN 15732-2014 Materiales ligeros de relleno y productos aislantes térmicos para aplicaciones en ingeniería civil, Productos a base de áridos ligeros de arcilla expandida.

Como se mencionó con anterioridad, actualmente no se dispone de un marco normativo específico que regule el empleo de NFU's. Por tal motivo, resulta de interés el estudio de normativa específica de áridos ligeros (arcilla expandida) en aplicaciones de ingeniería civil a modo de comparativa y para establecer bases de puesta en obra de los NFU's.

En general, la arcilla expandida se usa para reducir, compensar o prevenir asentamientos de terrenos, así como para mejorar la estabilidad de una estructura o áreas de relleno en el trasdós de muros de contención [115]. En la mayoría de los casos se puede utilizar

como material de rellenos aligerados en aplicaciones o proyectos de construcción de infraestructura. Presenta una combinación de propiedades de alta resistencia y baja densidad aparente, mostrándose como un buen sustituto de material convencional.

La norma UNE-EN 15732:2014 [116] especifica los requisitos para los productos a base de áridos ligeros de arcilla expandida (LWA del inglés Light Weight Aggregate) para aplicaciones de ingeniería civil.

### 5.3. *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras (PG-3)*

En España, todos los aspectos relativos a la construcción de obras lineales viarias están recogidos en el PG-3 que ha adquirido rango de norma [99, p. 06]. Se cuenta con una clasificación de los suelos potencialmente utilizables en obras lineales viarias en base al análisis de un conjunto de propiedades. Se contemplan desde los suelos de mejores características hasta los de menores propiedades, su clasificación es: suelos seleccionados, adecuados, tolerables, marginales e inadecuados. En su artículo 330, se establece una clasificación de acuerdo al tipo de material no convencional o residuos que se pueden utilizar en terraplenes de carreteras (Tabla 11) [99, p. 05]:

*Tabla 11. Materiales no convencionales y residuos de posible utilización en terraplenes de carreteras.  
 Fuente: [99, p. 05].*

CLASIFICACIÓN	TIPO DE MATERIAL
<i>MATERIALES NATURALES NO CONVENCIONALES</i>	-SALINOS: yeso, sal común, anhidrita. -EXPANSIVOS. -COLAPSABLES. -ROCAS DEGRADABLES: Rocas porosas: cretas, tobas. Rocas arcillosas degradables: pizarras arcillosas, margas, argilitas. -MATERIALES VOLCÁNICOS: escorias; lapili, arenas volcánicas, cenizas. -SUELOS RESIDUALES TROPICALES: suelos lateríticos. -PERMAFROST.
<i>RESIDUOS DE EXPLOTACIÓN MINERA Y DE CANTERAS</i>	-ESCOMBROS DE CANTERAS: pizarras, granitos, mármoles -ESTERILES DEL CARBÓN. -ESTERILES DE OTROS MINERALES: Cobre, mercurio, etc.
<i>SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES</i>	-SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA: Escorias de horno alto. Escorias de acería Otras escorias: cobre, mercurio, plomo. -SUBPRODUCTOS DE CENTRALES TÉRMICAS: Cenizas volantes. Cenizas de hogar y escorias. -OTROS SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES.
<i>RESIDUOS URBANOS E INDUSTRIALES</i>	-ESCORIAS DE INCINERACIÓN DE RSU. -RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN. -NEUMÁTICOS FUERA DE USO.

	-RESIDUOS DEL PROCESAMIENTO DE LA MADERA. -RESIDUOS DE LA FUNDICIÓN DE PIEZAS METÁLICAS.
<i>MATERIALES FABRICADOS</i>	-MATERIALES POLIMÉRICOS. -HORMIGONES LIGEROS. -ARCILLA EXPANDIDA.

Los residuos que han sido objeto de un mayor número de estudios y de los que se disponen de más experiencias prácticas en España son los siguientes [99]:

- Neumáticos fuera de uso: NFU's
- Residuos de construcción y demolición: RCD's
- Estériles de carbón
- Escorias de acería LD

A continuación se señalan los parámetros más relevantes de los materiales no convencionales con mayor implementación (Tabla 12):

*Tabla 12. Propiedades y observaciones de los materiales marginales tipo residuos.*

*Fuente: [99, pp. 47–50], [117, p. 23].*

TIPO DE MATERIA L	PROPIEDADES PRINCIPALES	OBSERVACIONES PARA LA PUESTA EN OBRA DE MATERIALES
<i>NFU's</i>	Tamaño residuo troceado: 75 y 350 mm Densidad del NFU's sin compactar: 150 y 535 kg/m <sup>3</sup> . Densidad del NFU's compactado: 630 y 840 kg/m <sup>3</sup> Alta elasticidad. Resistencia al corte. Permeabilidad similar a las arenas: 5 x 10 <sup>-2</sup> cm/s. Poco compactable. Elevada resistencia al corte. Absorbente de vibraciones. Metales pesados < 0,1%. Resistencia a la acción de los mohos, calor, humedad, luz solar y rayos ultravioletas, No biodegradables ni tóxicos y no desarrollo bacteriológico.	- Las piezas de NFU's sólo se pueden colocar en el núcleo. - Las capas de NFU's han de colocarse por encima del máximo nivel freático esperable y de la cota de inundación prevista. - La cara inferior de las capas de NFU's debe estar situada, al menos, a 1 m por encima de la cota superior del terreno natural. - La cara superior de la capa de NFU's de mayor cota debe estar, como mínimo, a 1 m de la cara superior de la coronación del terraplén. - El espesor de las capas de NFU's no debe ser mayor de 3 m. - Las capas de NFU's han de envolverse en geotextiles para evitar la percolación de partículas de suelo entre las tiras de NFU's. - La distribución de tamaños y el contenido de alambres expuestos del material NFU's serán los de un material Tipo B (Clase II) de la Norma ASTM D6270-17. - Para una mezcla de relleno NFU's - suelo con las mejores características mecánicas posibles, lo más idóneo es fabricarla al 50% en volumen de ambos materiales. - Las capas intermedias de material terreno que hacen refuerzo estructural deben tener un espesor mínimo de 1 m y estar exentas de materia orgánica. - Los espaldones del relleno deben asegurar la impermeabilidad ante el agua o aire, y tener anchura suficiente para su adecuada compactación. - La capa de coronación ha de minimizar la infiltración del agua de lluvia hacia las capas de NFU's, drenándola con una ligera pendiente lejos de la estructura.
<i>RCD's</i>	Características dependientes de origen: cerámico u hormigón.	- Limitación del contenido de áridos reciclados cerámicos. - Mayor aportación de agua durante la compactación por su elevada absorción.

Elizabeth Contreras Marín  
 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS:  
 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU'S)

	<p>Tratamiento en plantas similares a los de áridos naturales.</p> <p>Áridos cerámicos: Absorción 6-25%, Densidad; 1200-1800 kg/m<sup>3</sup>, DLA: 20-50%.</p> <p>Áridos hormigón: Absorción 5-15%, Densidad; 2,1-2,6 kg/dm<sup>3</sup>, DLA: bajos.</p> <p>Áridos cerámicos problemas por presencia de yeso. Necesaria su eliminación.</p> <p>Áridos de hormigón: presencia de cloruros (procedencia marina). Necesaria eliminación de armaduras y no se puede estabilizar con ligantes hidráulicos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eliminación de impurezas (vidrios, plásticos...).</li> <li>- Control del contenido en materia orgánica.</li> <li>- Control del contenido en yeso y otras sales solubles. Los áridos reciclados lavados con agua presentan menor proporción de yeso.</li> </ul>
<i>ESTÉRILES DEL CARBÓN NEGROS</i>	<p>Baja plasticidad, incluso nula.</p> <p>Granulometría Continua: &lt;5% inf.0,08mm</p> <p>Densidad: 2,70-2,73 t/m<sup>3</sup></p> <p>CBR: &gt;50</p> <p>Proctor Modificado: &gt;1,9 t/m<sup>3</sup></p> <p>Humedad óptima: 10,2%-15,5%</p> <p>Alta degradabilidad bajo presiones elevadas</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactación con la W<sub>op</sub> o con humedades algo inferiores</li> <li>- Buen estudio del número de pasadas necesarias para correcta compactación. Exceso de pasadas provoca la degradación del material.</li> <li>- Espesores de tongada inferiores a 50-60 cm.</li> <li>- No utilizables en zonas inundables. Además deben eliminarse los fragmentos pizarrosos.</li> </ul>
<i>ESTÉRILES DE CARBÓN ROJOS</i>	<p>Plasticidad: LL: 26-20 y LP: 19-20</p> <p>Granulometría Continua: &lt;5% inf. 0,08mm</p> <p>Densidad: 2,74 t/m<sup>3</sup> CBR: &lt;20</p> <p>Proctor Modificado: 1,9 – 2,1t/m<sup>3</sup></p> <p>Humedad óptima: 7%-10%</p> <p>Alta degradabilidad bajo presiones elevadas</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se debe controlar la cantidad de CaO libre para evitar problemas de expansividad.</li> </ul>
<i>ESTÉRIL DE ACERÍA LD</i>	<p>Material algo poroso y muy denso, con <math>\gamma_{ap}</math> 3 t/m<sup>3</sup>.</p> <p>Absorción &lt;3%.</p> <p>Cal libre: 1% y el 15%.</p> <p>Elevada resistencia al corte.</p> <p>DLA entorno al 15%.</p> <p>Potencialmente inestable por la presencia de cal libre, y algo de magnesio se traduce en problemas de expansividad. Tarda semanas-meses en hidratarse.</p> <p>Su aplicación pasa por intentar reducir el porcentaje de CaO.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se debe controlar la cantidad de CaO libre para evitar problemas de expansividad.</li> </ul>
<i>POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)</i>	<p>Densidades 0,10 - 0,30 kN/m<sup>3</sup>.</p> <p>Absorciones entre el 1 – 3% en volumen en inmersión de 28 días.</p> <p>Exposición a temperaturas menores a 100°C para acciones de corta duración, y alrededor de los 80°C para acciones continuadas y con el material sometido a una presión de 20 kPa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los productos fabricados con EPS se caracterizan por ser extraordinariamente ligeros aunque resistentes.</li> <li>- Materiales del sector del aislamiento y embalaje. Incluso sumergiendo el material completamente en agua, los niveles de absorción son mínimos.</li> </ul>

Esta experimentación solo contempla los apartados correspondientes a las propiedades principales que deben cumplir los NFU's para su implementación. Los criterios de aceptación o rechazo en base a cálculos se encuentran en fase de desarrollo por parte de D<sup>a</sup> María Anguita García, dentro del proyecto de investigación "Utilización de neumáticos triturados fuera de uso (NFU) en obras de geotecnia".

En la Tabla 13 se muestra las partes de un terraplén en las que se pueden emplear los distintos tipos de materiales marginales, de acuerdo con PG-3, artículo 330 [99, p. 09].

*Tabla 13. Empleo de materiales marginales en las zonas del terraplén. Fuente: [99, p. 09].*

SUELO MARGINAL	PRINCIPAL CARACTERÍSTICA	CORONACIÓN	ESPALDONES	NÚCLEO	CIMIENTO
Suelo colapsable NLT 114 y UNE103500	Asiento > 1% a 0,2 MPa	NO	NO	Estudio especial	Estudio especial
Suelo expansivo UNE103601 y UNE103500	H.L. > 3%	NO	NO	H.L. > 5%: NO	< 5%
	0,2-2%	NO	NO	SI	
	2-5%	NO	NO	SI, con precauciones	
	5-20%	NO	NO	SI, con precauciones	
Suelo con yesos NLT 114	> 20%	NO	NO	NO	
	0,2-1%	NO	NO	SI	
Suelo con otras sales solubles NLT114	> 1%	NO	NO	Estudio especial	
	H ≤ 5 m y m.o. ≤ 5%	NO, si m.o. > 1%	NO	SI	
Materia orgánica UNE103204	H ≥ 5 m y m.o. > 2%	NO, si m.o. > 1%	NO	Estudio especial	

En la Tabla 14 e ilustración 14 se muestran las especificaciones técnicas exigidas a los distintos tipos de suelos establecidos en el PG-3, incluyendo los marginales.

*Tabla 14. Especificaciones técnicas según el PG-3(2002) para los tipos de suelos. Fuente: [99, p. 07].*

PARÁMETRO	SELECCIONADOS	ADECUADOS	TOLERABLES	MARGINALES
Materia orgánica UNE 103204	< 0,2%	< 0,1%	< 0,2%	< 5%
Sales solubles NLT 114	Yeso	< 0,2%	< 5%	
	Otras	< 0,2%	< 1%	
Hinchamiento libre UNE 103601 y UNE 103500			< 3%	< 5%
Asiento en ensayo de colapso NLT-254 y UNE 103500			< 1%	
	Tamaño máximo (mm)	≤ 100	≤ 100	
Granulometría	Otras condiciones	#0,4 < 15% (*)	#2 < 80% #0,4 < 75%	#2 < 80%
	Finos (#0,08mm)	< 25%	< 35%	

Plasticidad UNE 103103 y UNE 103104

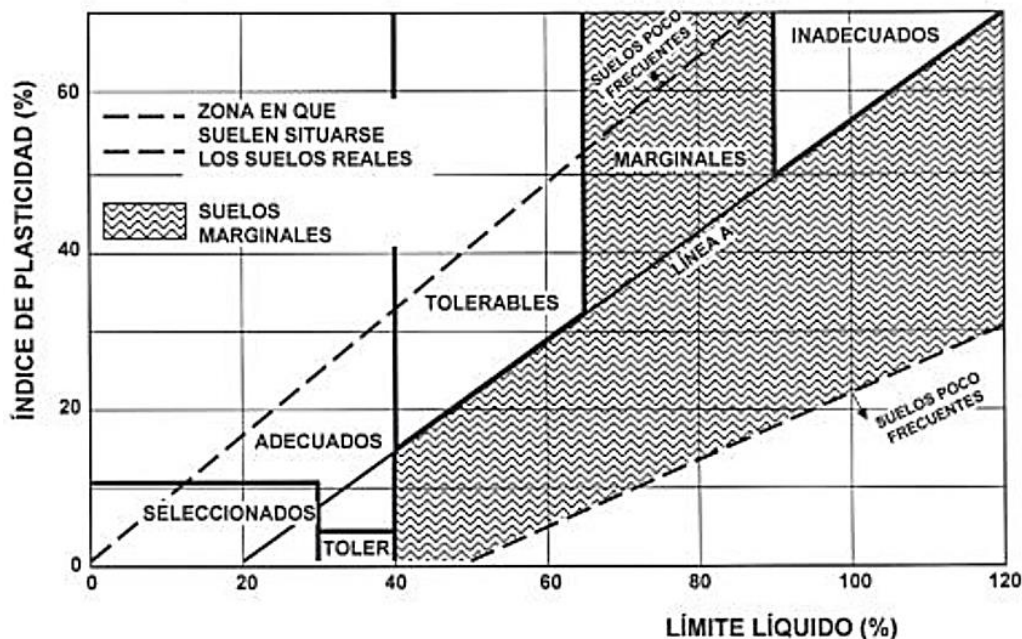


Ilustración 14. Clasificación de los suelos para terraplenes según la OC.326/00. Fuente: [99]

A continuación se indican algunos lineamientos en relación a la puesta en marcha para la implementación de materiales marginales (Tabla 15):

Tabla 15. Observaciones en relación a la puesta en obra en materiales marginales. Fuente: [99, p. 09].

MATERIAL	OBSERVACIONES EN PUESTA EN OBRA
Suelos expansivos	Estos suelos deben compactarse ligeramente del lado húmedo, con relación a la humedad óptima del ensayo Proctor de referencia. A humedades de menos dos por ciento (-2%) y de más uno por ciento (+1%) de la óptima de dicho ensayo Proctor de referencia (apartado 330.4.3 del PG- 3).
Suelos colapsables	Estos suelos deberán compactarse del lado húmedo, con relación a la humedad óptima del ensayo Proctor de referencia. A falta de otro criterio convenientemente justificado, se actuará de igual modo a lo indicado en el apartado 330. 4.3 del PG-3.
Suelos con yesos	Utilización limitada al núcleo del terraplén y siempre que se tomen, entre otras, las siguientes medidas para evitar la disolución con posible producción de asientos o pérdida de resistencia: <ul style="list-style-type: none"> <li>- El núcleo deberá constituir una masa compacta e impermeable.</li> <li>- Disponer medidas de drenaje e impermeabilizaciones para impedir el acceso al relleno de las aguas tanto superficiales como profundas.</li> <li>- Mayor del veinte por ciento (20%): Este tipo de suelos no debe utilizarse en ninguna zona del relleno.</li> </ul>
Suelos con otras sales solubles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inferior al cero coma dos por ciento (&lt;0,2%): Utilización en cualquier zona del terraplén.</li> <li>- Entre el cero coma dos y el uno por ciento (0,2 y 1%): Utilización en el núcleo del terraplén, sin necesidad de tomar precauciones especiales en coronación y espaldones.</li> <li>- Superior al uno por ciento (&gt;1%): Se requiere un estudio especial, aprobado expresamente por el Director de las Obras. Consideraciones sobre el empleo de residuos.</li> </ul>



---

<i>Suelo con materia orgánica</i>	En rellenos tipo terraplén de hasta cinco metros (5 m) de altura, se podrán admitir en el núcleo materiales con hasta un cinco por ciento (5%) de materia orgánica, siempre que las deformaciones previsibles se hayan tenido en cuenta en Proyecto. Para terraplenes de más de cinco metros (5 m) de altura el uso de suelos con porcentaje de materia orgánica superior al dos por ciento (MO > 2%) habrá de justificarse con un estudio especial, aprobado por el Director de las Obras. En coronación el contenido de materia orgánica será inferior al uno por ciento (1%).
-----------------------------------	---

---

La presente investigación señala de manera general las observaciones en puesta en obra a partir de las propiedades intrínsecas de NFU's. La siguiente fase del estudio de puesta en obra se encuentra en fase de desarrollo por D<sup>a</sup> María Anguita García, en la que se realizan los cálculos y las comprobaciones pertinentes para confirmar la viabilidad técnica de dicha implementación.

#### 5.4. EUROCÓDIGO 7 (EC-7) Proyecto Geotécnico

El EC-7 (UNE-EN 1997) [118] titulado Proyecto Geotécnico, trata los aspectos geotécnicos del proyecto de estructuras, de edificación y obra civil, estableciendo las reglas para determinar las acciones geotécnicas así como el planteamiento de las comprobaciones [119].

El Comité Europeo de Normalización (CEN) emitió la Parte 1 "Reglas generales" del Eurocódigo 7 "Proyecto Geotécnico" en Noviembre de 2004 y la Parte 2 "Investigación y ensayos del terreno" en Marzo de 2007. En estos documentos se proporcionan las bases que a continuación se describen [120]:

- La planificación y el informe de las investigaciones del terreno.
- Los requisitos generales para una serie de ensayos de laboratorio y de campo comúnmente utilizados.
- La interpretación y evaluación de los resultados de los ensayos.
- El establecimiento de valores derivados de parámetros y coeficientes geotécnicos.

En España, actualmente el CTE es el único documento normativo de índole geotécnico obligatorio. Sin embargo, el EC-7 es ampliamente utilizado y cada vez tiene más relevancia en el proyecto geotécnico. En dicho documento se plantean categorías geotécnicas según la complejidad de la estructura, las características del terreno y de las cargas y el nivel de riesgo aceptable, indicados en la siguiente tabla:

Tabla 16. Alcance de la investigación geotécnica en función de la Categoría. Fuente: [121].

CATEGORÍA GEOTÉCNICA	RIESGO	REQUISITOS DE LA INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA
1	Insignificante	Limitada y basada en la experiencia local (al igual que las verificaciones).
2	No excepcional	Según UNE-EN 1997-2.
3	Excepcional	- Al menos igual que en categoría geotécnica 2. - Posible incremento de número de ensayos o realización de otros diferentes.

Tal y como se indica en UNE-EN 1997-1, apartado 2.1, antes de iniciar la investigación geotécnica se debe establecer una categoría geotécnica de partida para la estructura, que posteriormente debe verificarse.

Según el EC-7, las propiedades del terreno requeridas para el cálculo de los parámetros geotécnicos se deben obtener a partir de ensayos de laboratorio, ya sea de modo directo o a partir de una correlación, de la teoría o de razonamientos empíricos, así como a partir de otros datos relevantes [118], a los que se les otorga el nombre de valores característicos de los parámetros geotécnicos.

En este sentido, la primera novedad que propone el proyecto es la evaluación de los parámetros geotécnicos a partir de sus correspondientes valores característicos de los granulados de NFU's, llevando a cabo correlaciones de los datos obtenidos en el laboratorio a aplicaciones en campo, que hasta el momento son en gran medida poco conocidas.

Esta línea de trabajo también permite dar nuevos usos al material granular de NFU's de pequeña granulometría, a través de un protocolo basado en la caracterización de las propiedades mecánicas en laboratorio de diferentes combinaciones de materiales, y su verificación mediante métodos de cálculo estadísticos.

## 6. USOS Y APLICACIONES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

### 6.2. Aplicaciones de los áridos naturales

Las aplicaciones de los áridos son numerosas y se encuentran presentes en una gran cantidad de actividades del ser humano, siendo sus dos grandes campos de aplicación la construcción (90%) y las aplicaciones industriales (10%). La elaboración de hormigón representa dos terceras partes del volumen dedicado a la construcción [40, p. 452].

De manera general y simplificada, a continuación se exponen las aplicaciones de los áridos naturales destinadas al sector de la construcción, considerando que dichas aplicaciones son afines a las que se consideran para los áridos reciclados (Tabla 17).

*Tabla 17. Aplicaciones de los áridos naturales. Fuente: [40, p. 453]*

<b>APLICACIÓN</b>		<b>PORCENTAJE (%)</b>
<i>CONSTRUCCIÓN</i> 90%	Hormigones y morteros	67,30
	Carreteras	20,80
	Balasto	1,70
	Escolleras	5,10
	Otros	5,10
<i>USOS</i> <i>INDUSTRIALES</i> 10%	Cementos	81,30
	Cales y yesos	4,90
	Vidrio	3,70
	Industria química	2,30
	Metalurgia básica	3,80
	Otros	4,00

Los áridos constituyen, aproximadamente, entre el 85 y el 95% de las capas de los firmes de las carreteras, por lo que sus características condicionan muy notablemente el resultado de la obra final. En general, el tamaño y la forma de las partículas representan dos de los factores más característicos en su comportamiento. Predominando las formas redondas o cúbicas, se suelen utilizar granulometrías sensiblemente continuas, con el fin de conseguir la máxima compactación del conjunto.

Parte de las actividades que desarrolla el centro CEDEX están enfocadas a la búsqueda y estudio de las prescripciones técnicas de materiales reciclados para su implementación en la construcción, con el objetivo de divulgar posibles aplicaciones. Se ha elaborado y se mantiene actualizado un catálogo de "Residuos Utilizables en Construcción", en cuyos apartados se encuentran incluidos los RCD's y NFU's.

La mayor parte de los problemas que presentan los suelos se encuentran relacionados con:

- Comportamiento inestable.
- Baja capacidad portante.
- Susceptibilidad volumétrica.
- Baja resistencia mecánica.

Todo lo anterior produce afectaciones como fisuras, fallas y posibles colapsos, en las obras lineales viarias que se construyen sobre ellos. La estabilización de los suelos es un procedimiento físico y/o químico que permite modificar sus características con la finalidad de mejorar su resistencia y deformación [122].

Para la estabilización de suelos es necesario tener en cuenta [123, pp. 76–80]:

- Cambios volumétricos: Causados por su expansión y contracción, debido al cambio de humedad.
- Resistencia: Depende de la energía de compactación y la humedad.
- Permeabilidad: A partir de la disipación de presiones de poro (produciendo deslizamientos) y el flujo de agua a través del suelo (originando tubificaciones y arrastres).
- Compresibilidad (Cambios de volumen): Afecta directamente a otras propiedades de los suelos como son la permeabilidad y la resistencia al esfuerzo cortante, provocando desplazamientos.
- Durabilidad: Resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico. Es uno de los aspectos más difíciles de cuantificar.

### 6.3. Aplicaciones de los áridos reciclados

Implementar materiales reciclados se presenta como un ejemplo de economía circular. Se ha demostrado que el uso de residuos industriales en trabajos geotécnicos produce beneficios para el medio ambiente, junto a la mejora de las características de las partículas y el uso óptimo de cada tipo de residuo [65], [79], [82], [111]. Muchos tipos de residuos industriales están disponibles en grandes cantidades; su escasa

implementación se debe en general, a la falta de metodología y normas de ensayo adecuadas que garanticen un buen rendimiento. Además, hay poca experiencia y difusión de las posibles aplicaciones y también faltan medios financieros, equipos técnicos, tiempo para desarrollar trabajos de investigación, formación adecuada y legislación.

De acuerdo con el PG-3 [124], [125] en la implementación de materiales no convencionales se deberá tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Los aspectos relacionados con las características y propiedades que confieren al material su carácter de marginal.
- Se evaluará la influencia de las propiedades intrínsecas del material a implementar dentro de la puesta en marcha.
- Posibles modificaciones en el comportamiento o evolución de otras zonas o elementos de la obra.
- Estudio pormenorizado, donde se indiquen las características resistentes del material y los asentos totales y diferenciales esperados, así como la evolución futura de estas características.
- Conclusión justificada de los posibles usos del material en estudio.
- Cuidados, disposiciones constructivas y prescripciones técnicas a adoptar para los diferentes usos del material marginal dentro de la obra.

Existe una gran variedad de materiales clasificados como marginales (la mayoría materiales reciclados), entre los cuales cabe distinguir tres grupos:

1. Materiales naturales no convencionales.
2. Materiales fabricados expresamente para su utilización como relleno.
3. Residuos y subproductos industriales.

Dentro del primer grupo se engloban aquellos suelos y rocas que no cumplen las especificaciones para ser considerados suelos seleccionados, adecuados o tolerables. En el segundo grupo se tienen los materiales ligeros, como por ejemplo, el poliestireno expandido. El tercer grupo contempla una gran variedad de residuos, que podrían clasificarse en los siguientes subgrupos: los obtenidos de los ciclos de extracción de

materias primas; los residuos o subproductos industriales obtenidos durante la producción de otros materiales, y los residuos obtenidos al final de un ciclo de consumo [99, p. 04], entre los que se encuentran los NFU's.

#### 6.4. Aplicaciones de los NFU's

Las aplicaciones que pueden destinarse los NFU's, bien enteros o troceados, son muy variadas y de diferentes ámbitos industriales. Algunas cuentan con bastante información e implantadas en el mercado, mientras que otras potenciales aplicaciones están en fase de estudio (como las que se plantean en este proyecto de investigación).

Las aplicaciones para utilizar los NFU's en el ámbito de la ingeniería se pueden clasificar ampliamente en dos categorías [126]:

- Aplicaciones independientes (uso de llantas y pedazos de llantas / astillas de llantas)
- Aplicaciones compuestas (astillas de llantas mezcladas con suelos y / otros materiales).

A continuación se realiza un listado de las posibles aplicaciones, a partir de los beneficios que aportan las propiedades de los NFU's y la similitud que tienen con los RCD's en materia de residuos en la construcción:

- Material granular en firmes, rellenos y explanadas.
- Características exigibles a las zahorras recicladas de RCD'S.
- Características exigibles al material reciclado de RCD'S para cama de apoyo para tuberías.
- Características exigibles al material reciclado de RCD'S para material drenante.

Aunado a ello, se proponen las aplicaciones en las que se requieren bajos niveles de asentamiento.

- Material para relleno de muros y drenajes.
- Material para reducción de carga mediante rellenos.
- Material para reducción de las cargas laterales.
- Material en muros para barreras de ruido.

Todas las aplicaciones antes mencionadas presentan beneficios potenciales. El criterio de evaluación de las posibles aplicaciones se establece en base al impacto de su implementación y de los posibles beneficios que se obtengan de las propiedades del material. A continuación se exponen las aplicaciones encontradas en las bibliografías consultadas.

#### 6.4.2. Los NFU's en aplicaciones de Ingeniería Civil

Hasta el momento, la utilización de NFU's en aplicaciones de ingeniería civil ha sido en gran medida en terraplenes y capas asfálticas, con poca repercusión pero con posibilidades reales. La investigaciones que mayor repercusión plantean son aplicaciones de rellenos, debido a las grandes cantidades de material que se requieren, que se entendería en una repercusión económica, así como a las características necesarias para su implementación[126]. Por ello, se decide llevar a cabo dentro de esta experimentación aplicaciones basadas en dicha premisa.

Una de las primeras propuestas de implementación de NFU's en obra civil, fue la ideada por Humphrey en EUA (1998), planteando el uso de grandes volúmenes para contrarrestar la acumulación en plantas de tratamiento y el deterioro de los vertederos. Se lograron emplear más de 15.000 Tn en tan sólo tres obras: trasdosado de un falso túnel, relleno en un estribo y terraplenes de acceso a un puente [127].

El potencial que presentan los Agregados Derivados de Neumáticos (por sus siglas en inglés TDA, partículas de 50 - 305 mm) en ingeniería civil es grande y se propone como una solución al problema de la eliminación de residuos. Según la investigación de J.C. Lopera (2016) [128] el uso de éstos podría ser ventajoso en proyectos de ingeniería en los siguientes escenarios:

- Reducción de las presiones laterales de tierra en los muros de contención.
- Reducción de asentamientos para terraplenes.
- Proporcionar capas de filtro para el drenaje en vertederos.
- Proporcionar amortiguación a los cimientos y para fines de mitigación de licuefacción.



Los fragmentos de NFU's tienen un bajo peso unitario, una alta permeabilidad y un alto valor aislante, lo que los convierte en un excelente relleno para terraplenes construidos en terrenos débiles, estabilización de desprendimientos, relleno de muros de contención y estribos de puentes, aislamiento para limitar la penetración de las heladas bajo las carreteras y capas de drenaje para vertederos [129].

El uso de TDA como base para carreteras, vías férreas, material de drenaje, rellenos sanitarios, relleno de subrasante, relleno para muros y puentes, o capas aislantes, se plantea como una solución ventajosa, ya que de manera general, se puede decir que el TDA es entre un 30 y un 50% más ligero que los suelos convencionales; drena 10 veces mejor que un suelo bien graduado y proporciona un aislamiento 8 veces mejor que la grava [87], [130]. La implementación en capas drenantes en los sistemas de recolección de lixiviados y sellado de vertederos se basa en dos propiedades características: su elevada permeabilidad junto a su baja densidad, y la capacidad de absorción del residuo, que pueden disminuir la carga de contaminación de los lixiviados [91]. En terraplenes se emplea como material ligero sobre suelos con baja capacidad portante [131]. Las investigaciones de Ignacio San Martín (2009) [91] indican que se consigue aligerar el peso del mismo y la consecuente carga transmitida a los cimientos, lo cual puede reducir, o llegar a evitar, los costosos métodos de mejora del terreno en suelos blandos. Además, permite utilizar grandes cantidades de residuo, mejorar la permeabilidad, la resistencia a las heladas y la durabilidad.

Para las aplicaciones de relleno fluido, especialmente cuando se construye sobre suelos blandos y comprimibles, es importante reducir la densidad del relleno para minimizar el asentamiento del suelo. La implementación de granulados de NFU's puede reducir hasta un 40% los asentamientos en comparación con un suelo convencional [101], además de producir densidades aparentes del orden del 60 al 80% de la densidad aparente típica de los rellenos fluidos estándar mezclados con arena [101]. El análisis de compresibilidad de los TDA indica que el módulo de Young es de 2 a 3 órdenes de magnitud menor que el módulo del suelo granular. Por lo tanto, es necesario colocar al menos 0,9 m (3 pies) de suelo convencional sobre una capa de TDA para evitar o minimizar las deflexiones de la superficie [108].

En las investigaciones referentes a la incorporación de granulados de NFU's en sustitución de áridos convencionales, donde se busca la mejora de las propiedades intrínsecas del suelo, se encuentran sustituciones con bajos porcentajes [128], [132]–[134], en muchos casos inferiores al 20%. Algo similar ocurre en el caso de adición en suelos convencionales [110], donde las aportaciones suelen estar en torno al 5%, 10%, 15% y 20% por unidad de peso seco del suelo.

N Álvarez et al. (2020) [135] evaluó cuál podría ser la mayor resistencia y capacidad de soporte a la penetración del suelo arcilloso mediante la adición de 1,5%, 2,5% y 3,5% de polvo de caucho. Para el ensayo de caja de cizalla, la cohesión de la mezcla aumentó y el ángulo de fricción interna disminuyó con respecto al suelo convencional, resultando la suma en un aumento de la resistencia al corte.

Los resultados de Hasan Cetin et al. (2006) [82] indican que es posible el uso de astillas de caucho mezcladas con suelos arcillosos como material de relleno (hasta un 20%). Afirma que se pueden utilizar por encima de las capas freáticas del suelo, donde se necesita poco peso, baja permeabilidad y alta resistencia, en rellenos como terraplenes de carreteras, estribos de puentes y rellenos de trasdós en muros de contención. Su aplicación también puede ser indicada especialmente en estructuras que se van a construir sobre suelos de cimientos débiles con baja capacidad de carga y altos problemas de asentamiento.

Uno de los problemas que puede surgir cuando se utilizan los NFU's como material de relleno en los terraplenes (cuando no están bien cubiertos por el suelo) es la probabilidad de que se produzca un auto calentamiento de los NFU's; esto puede resolverse con un diseño y una construcción adecuados para cada proyecto. Este problema también puede evitarse reduciendo la cantidad de trozos de neumáticos finos, limitando el espesor de las capas de neumáticos a 3 m y restringiendo el acceso del relleno al aire y al agua, de acuerdo con lo que establece la norma ASTM D 6270 [84].

### 6.4.3. Fabricación de hormigones con NFU's

Para el uso de cualquier material no convencional en la elaboración de hormigones, es necesario cumplir con propiedades que permitan mantener las mismas prestaciones que aportan los áridos convencionales.

A continuación se describen algunas propiedades y recomendaciones (Ver tabla 18).

*Tabla 18. Recomendaciones para áridos reciclados en la fabricación de hormigones. Fuente: [45].*

<b>PROPIEDAD</b>	<b>RECOMENDACIÓN</b>
<i>Tamaños máximo y mínimo</i>	El tamaño mínimo permitido de árido reciclado es de 4 mm.
<i>Granulometría</i>	Los áridos reciclados deberán presentar un contenido de desclasificados inferiores menor o igual al 10% y un contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%.
<i>Resistencia al desgaste; coeficiente de los ángulos</i>	No superior al 40%.
<i>Absorción</i>	No superior al 5%.
<i>Absorción a los 10 minutos</i>	Inferior a 5,5%.
<i>Módulo de deformación longitudinal</i>	El módulo de deformación longitudinal disminuye progresivamente al aumentar el porcentaje de árido reciclado. Para un 100% de árido grueso reciclado, el módulo del hormigón será 0,8 veces el del hormigón convencional.
<i>Retracción del hormigón</i>	La retracción aumenta progresivamente al aumentar el porcentaje de árido reciclado. Como valor orientativo, y para un 100% de árido grueso reciclado, la retracción será 1,5 veces la de un hormigón convencional.
<i>Fluencia del hormigón</i>	Para un 100% de árido grueso reciclado, la fluencia será 1,25 veces la de un hormigón convencional.

Para el caso de RCD's en hormigones, su proceso de elaboración con respecto al convencional conlleva un aumento de la consistencia para una misma relación a/c [51]. Se debe de tener en cuenta ello, debido a la mayor capacidad de absorción de los áridos reciclados, que produce una reducción de la relación a/c efectiva durante el proceso de elaboración [39]. Como consecuencia, la consistencia del hormigón fresco es mayor.

La sustitución de NFU's en hormigones es un campo menos estudiado y los resultados encontrados son dispersos. La mayoría de las investigaciones buscan aprovechar sus propiedades elásticas y producir rupturas plásticas en los hormigones. Sin embargo, en líneas generales, la mayor porosidad que presenta el hormigón con NFU's [101] le hace más susceptible a sufrir los efectos del ambiente, por lo que muchas normativas y recomendaciones restringen su uso al caso de ambientes no agresivos [136]. Se ha observado también una reducción de la densidad del mortero. Sin embargo, se obtienen

hormigones más tenaces, flexibles y resistentes a ciclos de hielo/deshielo. También se obtienen mejoras en el aislamiento acústico y térmico del hormigón [100, p. 20].

En los estudios de Ismail y Al-Hashmi (2016) encontraron que la pasta de hormigón tiene una baja adherencia a productos de caucho, por lo tanto se obtienen menores resistencias en comparación con un hormigón con áridos naturales [137]. Otra observación realizada por Ganjian E et al. (2009) [93] es referida a la baja densidad de la partícula de caucho que tiende a desplazarse hacia la superficie del molde en la fabricación de especímenes, resultando en una alta concentración de caucho en la capa superior.

Bravo M & Brito J. (2011) [138] indicó que la absorción del hormigón es directamente proporcional al aumento del porcentaje de NFU's, apreciando poca adherencia entre las partículas de NFU's y la pasta, permitiendo mayor generación de recorridos que facilitan el paso del agua y por ende mayor porcentajes de absorción. En general, se concluye que para el aumento de sustitución del 5%, 10% y 15% con agregado de NFU's fino, la absorción es mayor. En las investigaciones de Ospina (2014) [139], la absorción superficial aumentó en un 69 %, comparando las mezclas de 0 y 30 %, lo que produce mezclas con mayor porosidad y permeabilidad que repercute en una mayor absorción.

En general, las propiedades mecánicas y de durabilidad de los hormigones con sustituciones de granulados de NFU's se ven afectadas. Presentan un comportamiento generalizado de reducción de valores frente a los presentados por la muestra sin sustitución de NFU's. El NFU más grueso se comporta de una mejor forma, debido a una mayor superficie de contacto, lo que reduce el espacio de propagación de las fisuras al momento de la aplicación de las cargas [93].

Los hormigones con mayores pérdidas en la resistencia a la compresión son aquellos que contienen altos porcentajes de sustitución de granulados de NFU's. Sin embargo, la resistencia a la compresión de las muestras con entre un 10% y un 20% de adición de granulados de NFU's presentan resultados similares a largo plazo (mayor a 90 días). La mayoría de los investigadores sugieren un contenido máximo de caucho del 20%

del volumen total del árido y un tamaño no mayor que el tamaño del caucho desmenuzado [140], es decir, entre 0,8 mm - 20 mm.

Contra poniéndose a estos resultados, Khatib et al. [100] identificó que la resistencia a compresión disminuye hasta un 47% para una sustitución del 10%, un 60% para una sustitución del 20% y un 82% para una sustitución del 30%. Las investigaciones de Toutanji (1996), señalan que la sustitución del árido grueso por 25%, 50%, 75% y 100% de NFU's produce pérdidas en la resistencia a la compresión de 39%, 56% 69 y 75% respectivamente. El autor destaca que el comportamiento es similar al de una parábola no lineal [139].

#### 6.4.4. Recuperación energética y mezclas asfálticas con NFU's

La recuperación energética y la incorporación a asfaltos y cementos, son tres de las posibilidades donde más se implementan los polvos de NFU's, al tratarse de sectores de gran consumo y de procesos que no requieren un tratamiento complejo del residuo. Su incorporación en la fabricación de planchas de caucho (junto a material virgen) o como modificador de materiales termoestables son otras de las vías apuntadas [86].

La termólisis o la gasificación son tratamientos que extraen los componentes materiales de los NFU's por medio de la incineración para su valorización energética. Sin embargo, son tratamientos desaconsejados actualmente debido al impacto ambiental negativo que supone al producirse emisión de partículas nocivas [91], aunque si se cuenta con las instalaciones apropiadas se pueden llegar a obtener emisiones menos contaminantes que las que se producen al utilizar combustible tradicional [106]. De acuerdo a esto, el Art. 1.1 de la nueva Ley 22/2011, de Residuos y Suelos Contaminados, indica que antes de proceder a la valorización energética del residuo se debe buscar una vía para su reutilización o reciclaje.

En el ámbito de ingeniería civil, los granulados de NFU's (partículas de 0,425 mm - 12 mm) se han limitado a su implementación en pavimentos flexibles, con porcentajes en combinación con el asfalto. En mezclas asfálticas, la tendencia se ha enfocado al "proceso húmedo", que lleva más de 45 años implementándose. Este método tiene varias ventajas, relacionadas principalmente con la capacidad de aumentar la elasticidad y la viscosidad

a alta temperatura. El betún modificado con caucho permite un umbral de viscosidad rotacional de 1500 cps a 177 °C. Pero el método sigue luchando actualmente por aportar más experiencias que repercutan en una mayor implementación [113].

#### 6.4.5. Elementos elásticos a partir de capas de NFU's

Los NFU's tienen propiedades que pueden llegar a implementarse en elementos elásticos, gracias a su capacidad de deformación y amortiguamiento de cargas, así como a su resistencia a agentes ambientales externos. Pueden ser utilizados como material en la construcción o rehabilitación de vías ferroviarias, añadiendo mayor elasticidad a éstas, además de reducir los problemas asociados a vibraciones y transmisión de cargas [141, p. 160], siempre que la densidad del material no sea inferior a 1000 kg/m<sup>3</sup> [142].

La investigación de Miguel Del Sol Sánchez (2014) [141] propone que a partir de las bandas que componen los NFU's, se pueden elaborar elementos elásticos planos, ya que sus propiedades físicas y mecánicas los hacen aptos para su uso en el ámbito de la ingeniería civil. Indica que se obtienen mejores comportamientos que con los elementos fabricados con otras materias primas. De esta manera, se puede utilizar de manera competitiva al no requerir aglomerante para la fabricación del elemento.

Carlos Hidalgo Signes (2017) [81] realizó una investigación sobre la mezcla de granulados de NFU's con áridos sin ningún tipo de aglomerante para la implementación en una capa de subbalasto en vías ferroviarias. Se indican dos ventajas medioambientales importantes, por un lado se menciona la reutilización de grandes cantidades de este residuo, mientras que la mezcla contribuye a una mayor resistencia a fragmentación, consiguiendo de esta manera ser reutilizados en capas de asiento en las vías ferroviarias.

#### 6.4.6. Rellenos de trasdós de muros de contención con granulados de NFU's

En general, se puede decir que los materiales de relleno ligero se utilizan en suelos débiles para varios propósitos [69], [99], [102], [143]:

Constructivos

- Construir rellenos con poca necesidad de mantenimiento.

- Reducir el peso del relleno y prevenir las deformaciones de la nueva construcción sobre los edificios cercanos.
- Reducir la consolidación de la sub-base sobre suelos débiles.
- Prevenir la diferencia de consolidación entre los rellenos y reducir la presión lateral de la tierra sobre estructuras de contención.
- Reducir los asentamientos sobre suelos débiles.
- Estabilizar los taludes en construcciones de carreteras.
- Mejorar el drenaje libre y el aislamiento térmico.

#### Medio ambientales

- Reducir la existencia de neumáticos de desecho, que son propensos a los incendios y peligros para la salud, además del ahorro en espacio de almacenamiento y tierras en los vertederos.

#### Económicos

- Disminuyen los costes de la estructura al generar menores cargas, conservan las fuentes naturales de áridos y desaparecen los costes de eliminación de los NFU's.

El conocimiento de las características de los NFU's ha llevado a la aparición de investigaciones centradas en su aplicación como relleno ligero de muros de contención [127], [144]–[146]. Para estas aplicaciones, el comportamiento del muro de contención está condicionado por la presión lateral del terreno, que viene definida por las características del material (ángulo de fricción interna y peso unitario).

La elevada deformabilidad con la que cuentan los NFU's, les permite absorber el esfuerzo de compactación del relleno sin transmitir empujes sobre el muro (del orden de los 2/3 de los empujes que se consideran habitualmente). Se menciona que además, su elevada permeabilidad lo convierte en un relleno drenante, que produce una significativa reducción del coste de las estructuras de contención, con un menor consumo de material, reduciendo así el uso de recursos y mejorando la eficiencia de la sección de hormigón utilizada [99, p. 23], [103].

Las investigaciones de Ignacio San Martín (2009) [91], fueron pioneras a nivel nacional en relación a la aplicación de granulados de NFU's en rellenos de obras de Ingeniería. En ellas se hace mención a una mejora en su comportamiento a partir de sus propiedades, basadas en su bajo peso específico y alta deformabilidad, limitando así los empujes horizontales sobre la estructura. Cecich et al. (1996) [79] utilizaron virutas de neumático (12-50 mm) como relleno de muros de contención ligeros, consiguiendo mayores niveles de seguridad contra el deslizamiento y el vuelco en comparación con los obtenidos al utilizar arena como relleno. Lee et al. (1999)[147] observaron que la presión horizontal sobre un muro de contención es menor cuando se rellena con una mezcla de virutas de neumáticos (50 y 305 mm) y arena que con un relleno de grava.

#### 6.4.7. Capas drenantes y absorbentes de ruido

Una de las aplicaciones con las que mayor información se cuenta de los gránulos de NFU's como componente básico es en la composición de la mayoría de los pavimentos deportivos y de seguridad, con la implementación de aglomerados con un ligante elástico, o bien como material suelto. En la mayoría de los casos las características que deben cumplir todos los pavimentos deportivos son: elasticidad, resistencia al deslizamiento y durabilidad [75].

Se estipula una absorción de la energía al impacto de entre un 15 y un 20%, para la práctica de deporte sin riesgo a sufrir lesiones; esta absorción sólo se puede conseguir mediante la utilización de suelos con mayor elasticidad. De esta forma, aquellos fabricados a partir de gránulos aglomerados de NFU's son más económicos y los que mejor se comportan. En este sentido, se plantea el uso de granulados de NFU's en parques infantiles y guarderías, en forma de baldosas prefabricadas o realizados in situ, y su composición es a base de gránulos de caucho aglomerados con resinas de poliuretano.

En relación a la ejecución de ciertos trabajos típicamente geotécnicos (estabilización, refuerzo, contención, etc.), puede dar lugar a una mejora de las condiciones de drenaje. A pesar de que el volumen de áridos para filtrado y drenaje es relativamente pequeño, en muchos proyectos de ingeniería juegan un papel determinante. Hasta la fecha, los



conocimientos existentes sobre el empleo de áridos reciclados como material drenante son escasos. No se cuenta con manuales o prescripciones técnicas para la puesta en marcha.

Las propiedades a considerar son aquellas que afectan a su permeabilidad, homogeneidad, estratificación o compacidad, influyendo también la existencia de vegetación y la permeabilidad (ligada a la granulometría).

En relación con las características que deben guardar los áridos en dicha aplicación, se requiere un coeficiente de permeabilidad superior a  $10^{-3}$  cm/s. Esto invalida casi todos los materiales con granulometría continua, cuyos coeficientes de permeabilidad son inferiores a dicho valor una vez compactados [40, p. 459].

Uno de los requisitos más importante para usar los NFU's como capa drenante es evaluar sus condiciones hidráulicas relacionadas con la permeabilidad, cuyo valor debe estar en un intervalo de  $10^{-2}$ - $10^{-1}$  m/s. Este rango se encuentra por encima de los materiales convencionales en capas drenantes, como son gravas y arenas, cuyos coeficientes de permeabilidad se sitúan en un valor aproximado de  $10^{-4}$ m/s [91]. Para emplear NFU's como capa drenante es necesario demostrar que su diseño cumple con dichos requerimientos a lo largo del tiempo y de las condiciones de carga que tendrá durante su vida útil.

El uso del granulado de NFU's en la producción de barreras acústicas puede ayudar a combatir los problemas existentes de eliminación de residuos y contaminación acústica. Este tipo de material, en casos donde existe alta exposición a agentes atmosféricos climáticos (especialmente lluvia) es ventajoso en comparación con algunos materiales usualmente utilizados (fibra de vidrio o lana de roca), ya que su rendimiento no disminuye con el agua o el polvo impregnado. Además, se puede pintar y limpiar fácilmente[148, p. 11].

Para contener pedazos o astillas de NFU's, se debe colocar una tela geotextil debajo de los mismos y envolver alrededor y por encima de ellos. El geotextil debe encerrar completamente los pedazos o astillas del neumático para proporcionar la contención necesaria [108].

## **7. FASE EXPERIMENTAL EN LABORATORIO**

El trabajo de investigación ha incluido la recopilación de investigaciones anteriores relacionadas con la caracterización de muestras similares a las de objeto de estudio, que sirvieron como punto de partida en la fase de planificación de los ensayos en laboratorio. En cuanto a las propiedades geométricas, físicas, mecánicas, e hidráulicas, se realizan las pruebas de laboratorio definidas en el Pliego de Prescripciones para Explanaciones Parte 3 (PG3-3) que se corresponde con la norma americana ASTM D6270-17, la cual define los procedimientos de laboratorio para aplicaciones de ingeniería civil de los NFU's. De igual manera se ha tomado en cuenta lo establecido en el CTE-DB SE-C referente a la implementación de edificios en contacto con el suelo.

Se llevaron a cabo varios ensayos de laboratorio con el objetivo de identificar y caracterizar las propiedades del material granular NFU's. Los estudios de laboratorio se basaron en las propiedades técnicas de mayor influencia en su comportamiento: granulometría, porosidad y compacidad, capilaridad, densidad, permeabilidad, cohesión y ángulo de rozamiento interno, etc. con la finalidad de obtener los parámetros geotécnicos a partir de los valores característicos de acuerdo al Eurocódigo 7, así como evaluar los parámetros con mayor dispersión y su influencia con el resto de las variables. Todo esto se acompañó de una campaña de ensayos enfocados en el comportamiento dinámico del granulado NFU's (a partir de los equipos edométricos) con el objetivo de evaluar las recomendaciones de implementación y analizar la compresibilidad con diferentes tamaños de NFU's.

En el estudio de campo se realizó un análisis del granulado de NFU's como relleno ligero y como material de amortización en capas internas de terraplén. En la experimentación en campo, se estudió la funcionalidad desde una perspectiva reductora de cargas y deformaciones transmitidas al terreno, aprovechando las propiedades de los granulados de NFU's: alta capacidad de drenaje y de aislamiento térmico, para rellenos de trasdosado de muros.

## 7.2. Datos relativos a las plantas analizadas

Todas las muestras analizadas durante la experimentación se obtuvieron a partir de un plan específico de toma de muestras de carácter representativo (especificando ensayos y frecuencia). La toma de las muestras para los ensayos siguió el procedimiento indicado en la norma UNE EN 932-2 [33], o siguiendo un método de recogida de muestras en big-bag como se menciona en CEN/TS 17188 [34].

Llegados a este punto, es importante mencionar el convenio de colaboración que se firmó a partir del proyecto de investigación, entre la Universidad de Sevilla y la Empresa SIGNUS "CONVENIO COLABORACIÓN ENTRE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA Y SIGNUS ECOVALOR, S.L., PARA LA COLABORACIÓN CIENTÍFICA ENTRE EL INSTITUTO UNIVERSITARIO DE ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA Y SIGNUS".

En específico se hace mención a las dos empresas andaluzas participantes:

- RENEAN (RECICLADO DE NEUMÁTICOS DE ANDALUCÍA S.L.), Espelúy, Jaén.
- RMD, (INDUSTRIA DE RECICLAJE DE ÁMBITO INTERNACIONAL) Aznalcóllar, Sevilla.

Las 2 plantas se encuentran inscritas en el padrón de Gestores de SIGNUS (Ver tabla 19). La selección de la muestra se ha realizado a partir de la producción y en base a una recopilación datos.

Tabla 19. Material granular de NFU's evaluado en la fase experimental.

PLANTA DE TRATAMIENTO	MATERIAL	LOCALIDAD
RENEAN	Material granular de 0'00 - 0'60 mm	JAÉN
	Material granular de 0'60 - 2'00 mm	
	Material granular de 2'00 - 4'00 mm	
RMD	Material granular de 0'00 - 0'80 mm	SEVILLA
	Material granular de 0'60 - 2'00 mm	
	Material granular de 2'00 - 7'00 mm	

La caracterización se realizó en el Laboratorio de Geotecnia de la ETSA (Escuela Técnica Superior de Arquitectura), órgano acreditado para la elaboración de ensayos geotécnicos.

### 7.3. *Datos relativos a la base de datos analizada*

Esta investigación se llevó a cabo mediante la búsqueda de artículos en diversas bases de datos y sitios web para encontrar investigaciones realizadas sobre las propiedades de los granulados de NFU's y sus posibles usos en aplicaciones geotécnicas. La búsqueda de trabajos se realizó entre Agosto de 2017 y Septiembre de 2021. Se hizo hincapié en las investigaciones que predecían modelos de comportamiento de los parámetros geotécnicos.

De los 212 documentos de investigaciones analizados, se reflejan las principales preocupaciones y sugerencias de los autores en relación a la implementación de materiales reciclados y en específico los granulados de NFU's. Se llevó a cabo el estudio de la bibliografía científica de las correlaciones existentes en los comportamientos del granulado de NFU's y sus correspondientes valores característicos.

La investigación se estructuró clasificando palabras clave relevantes, por ejemplo; valores característicos de los NFU's, influencia del tamaño de partícula, correlación entre propiedades y las aplicaciones geotécnicas de los NFU's.

Varios de estos artículos de investigación responden a revisiones publicadas y críticas de la metodología existente de la implementación de NFU's (por ejemplo la incineración como valorización energética). Se ha hecho un esfuerzo para capturar los datos publicados y las críticas metodológicas y sugerencias más allá de este grupo de autores.

Se destaca que la caracterización de los granulados de NFU's ( $\leq 12\text{mm}$ ), hasta el momento ha sido poco estudiada para el uso en aplicaciones geotécnicas. Señalan que aunque el caucho se recicla cada vez más con nuevas aplicaciones, una gran parte del mismo se emplea como combustible alternativo con fines energéticos.

En general, las investigaciones referentes a la implementación de NFU's en obras de geotecnia se han centrado en el estudio de tamaños de triturado entre 76 mm y 305 mm, y de virutas que suelen oscilar entre 12 mm y 76 mm. En este sentido, esta investigación pretende exponer una gama detallada de partículas menores de 12 mm, que generalmente no se detallan en la literatura.

En relación con la revisión de normativa nacional, informes, pliegos de prescripciones, guías y manuales, es importante destacar que uno de los problemas que obstaculiza la implementación de granulados de NFU's ( $\leq 12\text{mm}$ ) es la ausencia de procedimientos y manuales de diseño que permitan establecer las pautas para su uso. Actualmente en España no existen normas que permitan la implementación de partículas menores de 12 mm para sus diferentes aplicaciones en obras de geotecnia, a pesar de que se cuente con investigaciones que afirman sus beneficios y muestran resultados favorables.

#### 7.4. Equipos utilizados en la caracterización

Uno de los objetivos que plantea el proyecto de investigación es realizar un protocolo basado en la caracterización de un rango detallado de tamaños de partículas ( $\leq 12\text{mm}$ ) sin presencia de fragmentos de metal ni textil y que además, puede analizarse en la maquinaria del Laboratorio de Mecánica del Suelo de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla.

A continuación se detallan los diferentes equipos utilizados en la etapa de ensayos en laboratorio (Ver tabla 20):

*Tabla 20. Equipos utilizados en la caracterización de los granulados de NFU's.*

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>EQUIPO</b>
<i>Curva granulométrica</i>	Balanzas de varias capacidades, series de tamices UNE con aperturas desde 80 mm hasta 0,08 mm.
<i>Límite líquido (<math>W_L</math>), Límite plástico (<math>W_p</math>) Límite de retracción (<math>W_s</math>)</i>	Cuchara de Casagrande y dispositivo con penetrómetro con altura de caída prefijada.
<i>Humedad óptima y densidad seca máxima (fracción de suelo inferior a 20 mm)</i>	Sistema manual de compactación Próctor normal: maza de compactación, molde Próctor normal, balanza y estufa de desecación.
<i>Valores del CBR, agua absorbida e hinchamiento</i>	Compactador mecanizado o manual del Próctor normal o modificado.
<i>Coefficiente de permeabilidad (<math>K</math>)</i>	Permeámetro constituido por células de varios tamaños, piezómetros, probetas graduadas, termómetro y cronómetro.

---

<i>Resistencia a la compresión simple.</i>	Prensa (capacidad máxima de 20 t), medidores de fuerza y deformación, balanza y estufa de desecación.
<i>Cohesión y ángulo de rozamiento</i>	Equipos de corte tangencial para la determinación de la resistencia de probetas. La presión vertical máxima que se puede aplicar es de 0,9 MPa.
<i>Curva edométrica y curvas de consolidación</i>	Sistema de aplicación de cargas hasta 1,2 MPa y un sistema de medida y registro automático de las deformaciones, tipo LVDT, con apreciación de hasta 0,001 mm.
<i>Hinchamiento y presión de hinchamiento con control de sobrecarga y succión</i>	Método de presión neumática para succiones de hasta 12 MPa o por fase vapor para succiones de hasta 160 MPa.
<i>Deformación a carga constante de larga duración</i>	Equipo de compresión con mantenedor de carga y amplificador para medida con bandas extensométricas. La carga vertical máxima que se puede aplicar es de 0,615 MPa.

---

### 7.5. Métodos de ensayo, muestras y condiciones de ensayo

Uno de los objetivos planteados durante la investigación ha sido la correcta elección del marco de estudio. El objetivo de la selección de muestras es realizar mediciones y evaluaciones de un conjunto representativo para la validación de una muestra adecuada representativa.

De acuerdo con EC-7 (UNE-EN 1997) [118] el número necesario de muestras a ensayar depende de la homogeneidad del material, la calidad y cantidad de experiencia comparable con suelos convencionales y la categoría geotécnica a evaluar.

En la tabla 21 se indican el número mínimo de mediciones requeridas para obtener un resultado de ensayo y condiciones específicas para el tipo de experimentación, de acuerdo con la normativa correspondiente a la propiedad evaluada. Se asume que no se cuenta con experiencia comparable, y una categoría geotécnica 2 de riesgo no excepcional, es decir la consideración más desfavorable.

*Tabla 21 Métodos de ensayo, muestras y condiciones del granulado de NFU's en la fase experimental.*

TÍTULO	MÉTODO DE ENSAYO	NÚMERO MÍNIMO DE ENSAYOS	CONDICIONES ESPECÍFICAS
<i>Granulometrías (curvas granulométricas, módulo granulométrico)</i>	ASTM D422 UNE-EN 933-1 UNE-EN 933-2 UNE 103101	4-6	
<i>Densidad aparente de la muestra (pb); partículas (pa); secadas en estufa (prd); saturadas y secadas superficialmente (pssd); absorción de agua (W<sub>A24</sub>)</i>	ASTM C127 ASTM D1557 UNE-EN 1097-6 UNE 103302 UNE-EN 17982-3 UNE-EN 1097-3 UNE 103501	3	Método de la balanza hidrostática o por el picnómetro.
<i>Coefficiente de absorción y porosidad</i>	UNE-EN 1097-6 anexo C ASTM C 128	3	
<i>Límites de Atterberg: Determinación del límite líquido; Índice de plasticidad; Hincharse libre</i>	ASTM D4318 UNE-EN ISO 17892-12	3-5	Método de Casagrande
<i>Clasificación de suelo</i>	UNE 14688-1 UNE 14688-2		
<i>Permeabilidad Coefficiente de permeabilidad (K)</i>	ASTM D2434 UNE EN 103403	3	Método de carga constante
<i>Ensayo de compactación Proctor normal - modificado</i>	ASTM D854 ASTM D698	5	Normal (583Kn/m <sup>3</sup> )

	ASTM D1557 UNE-EN 13286-2		Modificado (2,632Kn/m <sup>3</sup> )
<i>Esfuerzo cortante</i>	ASTM D3080 UNE 103401	6	Parámetros de resistencia de corte a una muestra de suelo
<i>Ensayo edométrico</i>	UNE 103405	3	Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro

## 7.6. Propiedades físicas

### 7.6.1. Propiedades geométricas y dimensionales: curvas granulométricas, límites de Atterberg

Los resultados de los ensayos de tamizado se elaboraron de acuerdo a las 2 normas referentes al análisis granulométrico:

- La norma UNE-EN ISO 17892-4:2019 [149] para materiales convencionales.
- La norma UNE-EN 14243-2:2019 [150] para materiales producidos a partir de NFU's.

De acuerdo con estas normas, el tamaño nominal consiste en un tamaño nominal superior ( $\geq 90\%$  material que pasa) y un tamaño nominal inferior ( $\leq 10\%$  del material pasa). La granulometría resultante es la composición de los distintos tamaños de las partículas que integran el compuesto, con la designación por un par de tamices (d/D), en términos del menor (d) y del mayor (D) tamaño de los mismos.

La norma ASTM D6270-17 [96] describe los tamaños de partícula habitualmente producidos para aplicaciones de ingeniería civil, que suelen ser partículas de diámetros de 50 – 305 mm. Esta investigación se centra en el estudio de las propiedades de las partículas de caucho menores de 12 mm, un producto clasificado como caucho granulado. Los métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas incluyen también el contenido de acero y textil libre ( $\leq 5\%$ ).

La clasificación AASHTO divide a los suelos (o materiales en sustitución) en dos grupos:

- Suelos granulares: son los cuales pasan por el tamiz N°200 (0,080mm), con un 35% o menos de material retenido en el molde.



- Suelos finos: son el material que presenta más del 35 % de pasante en la malla N°200.

Por otro lado, la Clasificación SUCS (Clasificación de Suelos Unificada de Casagrande) presenta un sistema que clasifica los suelos en: gruesos, suelos finos y suelos orgánicos. Los suelos gruesos se dividen a su vez en gravas y arenas: si más del 50% del suelo grueso se retiene en el tamiz N°4 (5mm) se considera grava, y si más del 50% de suelo fino pasa por el tamiz N°4 pertenecerá al grupo de las arenas [151].

Varias investigaciones afirman que el tamaño del granulado de NFU's puede tener un efecto en su comportamiento, aún en rangos cortos de comparación [86], [133], [152], [153]. Las granulometrías evaluadas se muestran en la Tabla 22. De manera simplificada, se ha considerado que los gránulos finos están por debajo de 2,00 mm (tamiz N° 10), mientras que los gruesos tienen un tamaño entre 2 mm (tamiz No. 10) y 8 mm (tamiz 5/16). Se estudió el efecto de los NFU's finos y gruesos por separado, ya que, al igual que los suelos de grano fino y grueso, estos pueden comportarse de diferente manera.

*Tabla 22. Dimensiones de los NFU's por tamaño y designación*

DESIGNACIÓN	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>
<i>Tamaño (mm)</i>	0.0-0.8	0.6-2.0	2.0-4.0	2.0-7.0	90% 2.0-7.0 + 10% 0.6-2.0	50% 2.0-7.0 + 50% 0.6-2.0	33% 2.0-7.0+ 33% 0.6-2.0 + 33% 0.0-0.8

En ingeniería civil, los límites de Atterberg se utilizan como especificaciones técnicas para controlar el uso de un material como relleno de terraplén [62]. Por esta razón se realizó cuidadosamente en el laboratorio el estudio de los límites de Atterberg, con el objetivo de realizar la clasificación SUCS de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 17892-12:2019 [154]. En investigaciones anteriores se obtuvieron resultados similares en suelos arcillosos y mezclas con porcentajes inferiores al 30% de NFU's [82], [110], [155]. Sin embargo, no se encontraron investigaciones de ensayos con 100% de NFU's. Es por ello que en esta investigación se realizaron varios ensayos para obtener: límite líquido ( $W_l$ ), límite plástico ( $W_p$ ) y límite de retracción ( $W_s$ ). Las muestras presentaron nula adherencia entre las partículas y poca compacidad, lo cual impidió que se pudieran realizar las pruebas de manera satisfactoria y obtener resultados razonables (Ver ilustración 15). El

material presenta nula cohesión, funciona como un material arenoso, cuya fricción se asimila a una cohesión.

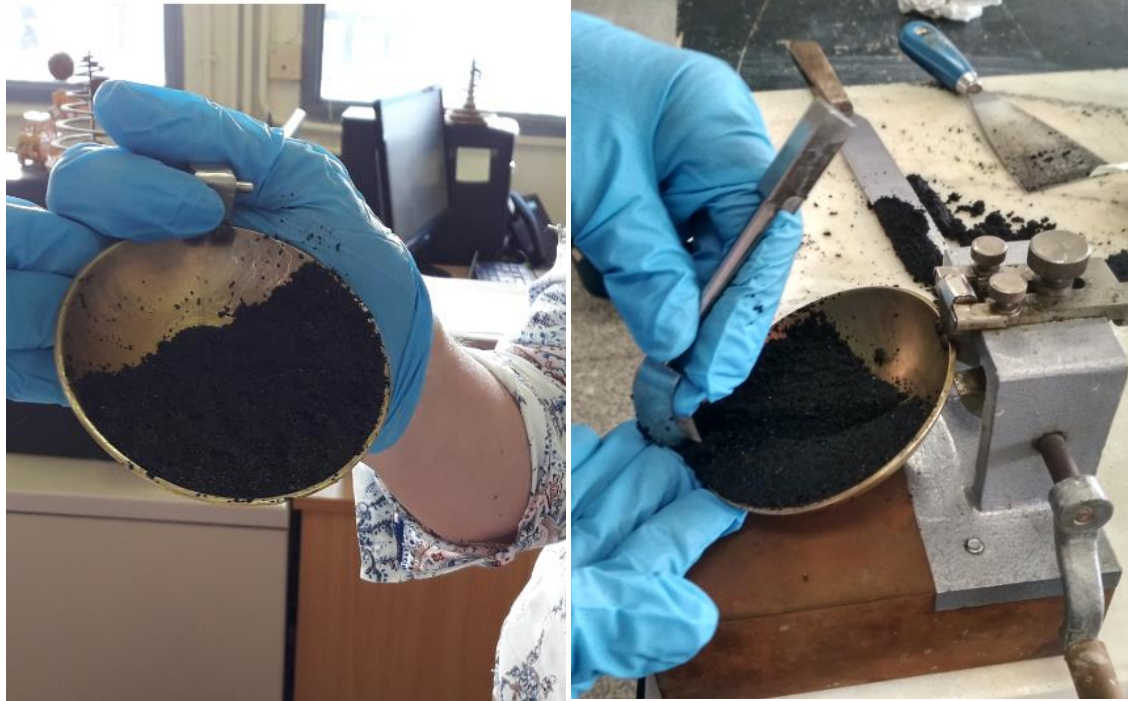


Ilustración 15. Ensayo de límites de Atterberg del granulado de NFU's (polvo  $D < 0,8$  mm).

Las curvas granulométricas del material estudiado se muestran en las ilustraciones 16 y 17, mientras que las características granulométricas quedan reflejadas en la tabla 23 que incluye los tamaños del grano ( $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$ ), coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y de curvatura ( $C_c$ ) de las muestras evaluadas de los NFU's.

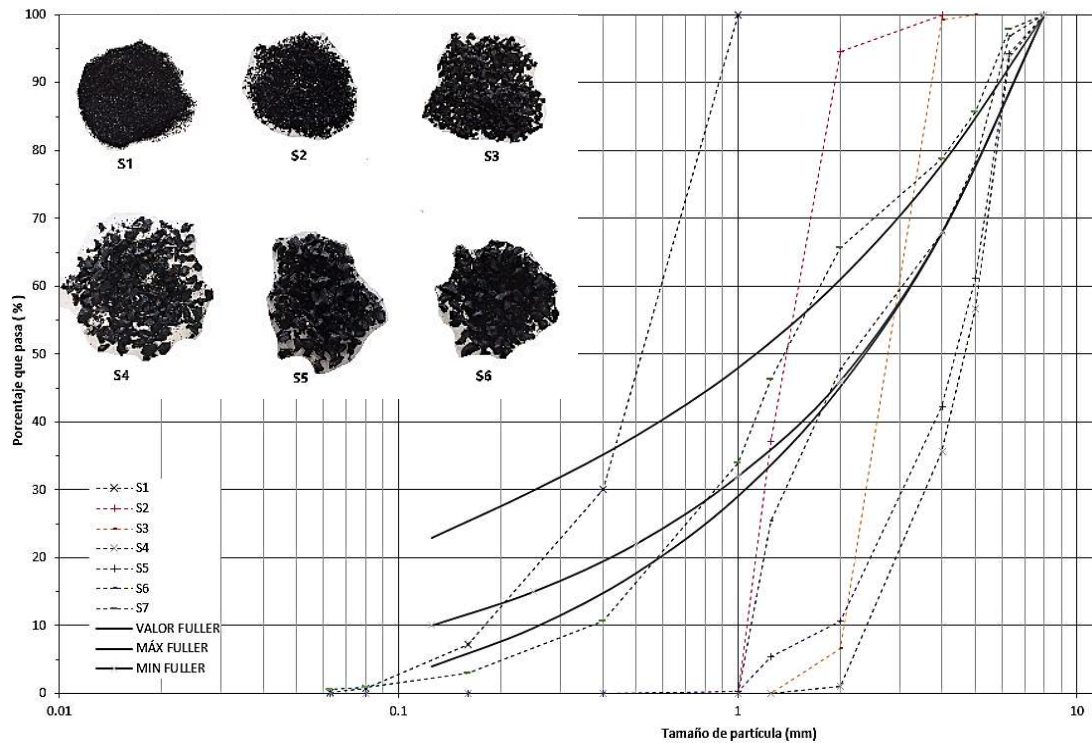


Ilustración 16. Curvas granulométricas del conjunto de muestras de granulados de NFU's.

Tabla 23. Tamaños del grano ( $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$ ), coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y de curvatura ( $C_c$ ) de los NFU's.

Muestra	Tamaño (mm)	$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{60}$	$C_u$	$C_c$	CLASIFICACION SUCS [156]
S <sub>1</sub>	0.0 - 0.8	0.18	0.40	0.60	3.33	1.48	Arena mal graduada (SP), pasa el 7% de finos del tamiz n° 200 (0.08mm)
S <sub>2</sub>	0.6 - 2.0	1.10	1.20	1.60	1.45	0.82	Arena mal graduada (SP)
S <sub>3</sub>	2.0 - 4.0	2.00	2.40	3.00	1.50	0.96	Arena mal graduada (SP)
S <sub>4</sub>	2.0 - 7.0	2.40	3.70	5.00	2.08	1.14	Grava mal graduada (GP)
S <sub>5</sub>	90% 2.0 - 7.0 + 10% 0.6 - 2.0	2.00	3.00	5.00	2.50	0.90	Grava mal graduada (GP)
S <sub>6</sub>	50% 2.0 - 7.0 + 50% 0.6 - 2.0	1.10	1.50	3.00	2.73	0.68	Arena mal graduada (SP)
S <sub>7</sub>	33% 2.0-7.0+ 33% 0.6-2.0 + 33% 0.0-0.8	0.38	0.85	1.80	4.74	1.06	Arena bien graduada (SW) ( $C_u > 4$ ; $C_c$ entre 1-3)

Elizabeth Contreras Marín  
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS:  
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU'S)

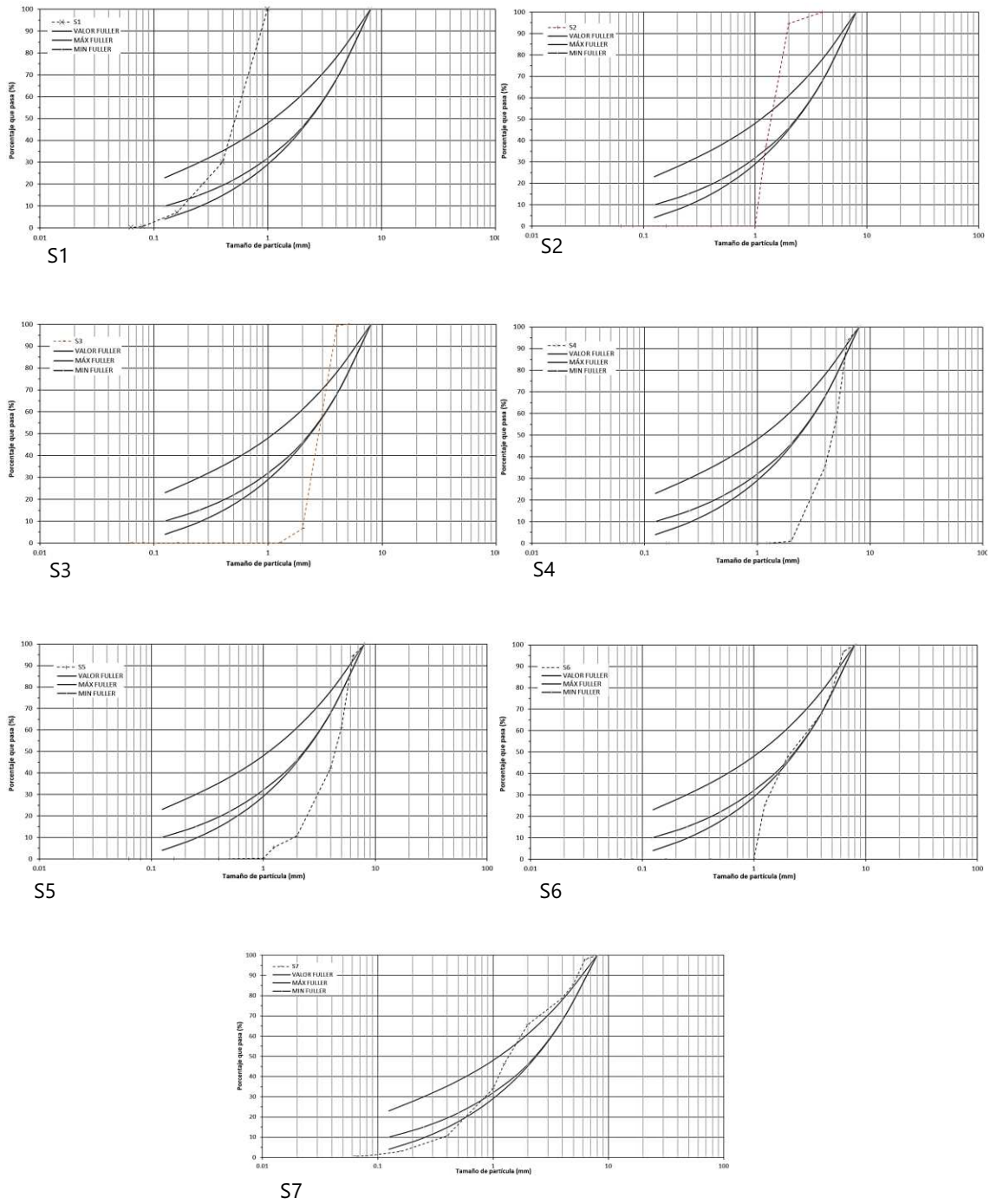


Ilustración 17. Curvas granulométricas individuales de muestras de granulos de NFU's.

Se observa que la muestra S<sub>7</sub> (33% 2.0-7.0 + 33% 0.6-2.0 + 33% 0.0-0.8) puede clasificarse como bien graduada, se confirma que la combinación de granulometrías mejora el comportamiento y acomodo de las partículas. Se han encontrado resultados similares en astillas de NFU's (12-50mm) donde se han clasificado como material de grano grueso bien graduado, similar a la arena y grava o como una arena (SW) bien graduada con grava [108].

#### 7.6.2. Densidades, Peso específicos y Absorción del granulado de NFU's

La densidad de las partículas se calcula a partir de la relación entre la masa y el volumen. El procedimiento para la obtención de la masa tras su secado en la estufa, y el volumen a partir de la masa de agua desplazada.

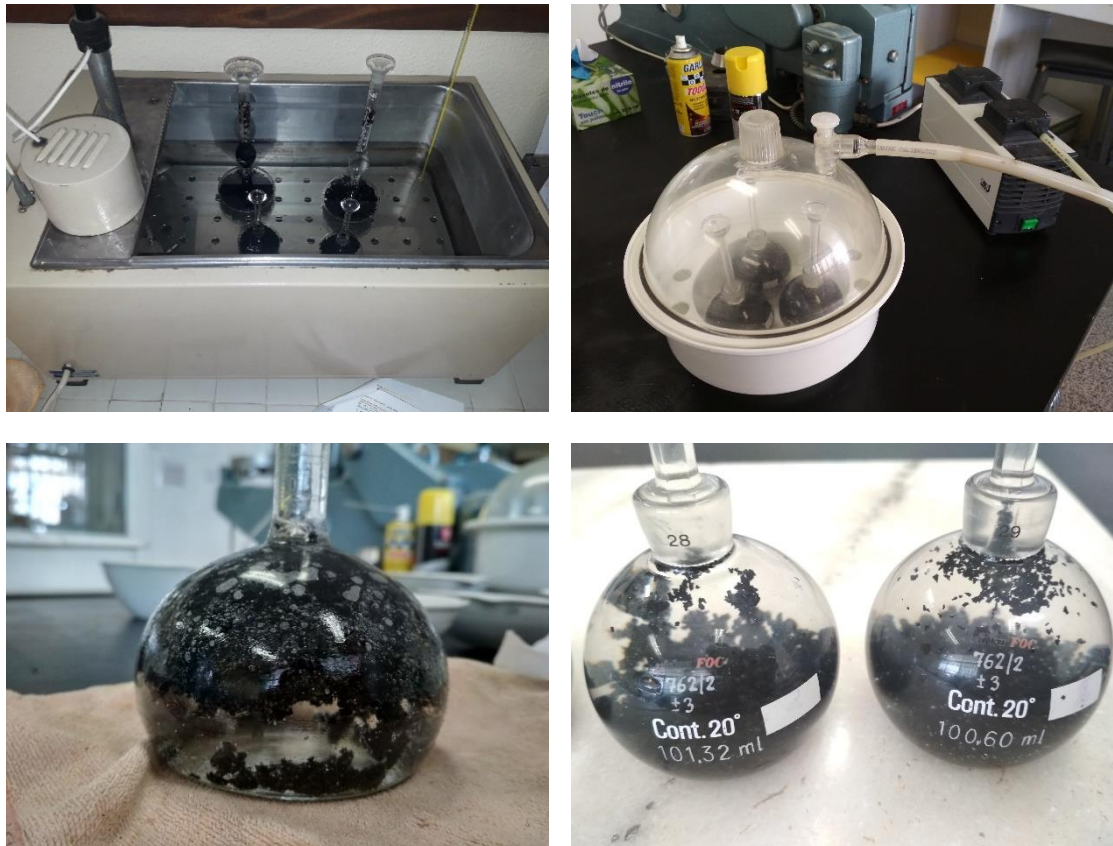


Ilustración 18. Ensayo de densidad aparente de la muestra ( $\rho_b$ ); partículas ( $\rho_a$ ); secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ ); saturadas y secas superficialmente ( $\rho_{ssd}$ ); absorción de agua ( $W_{A24}$ ) de los granulados NFU's.

Se obtuvo por el método de la balanza hidrostática o por el picnómetro, de acuerdo a la norma UNE-EN 1097-6 Anexo C y E [157] para granulometrías superiores a 4 mm, método utilizado por otros autores para áridos ligeros [158]–[160] (ver imagen 18). Además, la densidad de las partículas de los granulados NFU's se determina en base a la norma UNE-EN 17 892-3 [161] mediante un análisis hidrométrico.

Se han tenido en cuenta los requerimientos de la norma UNE-EN 13055-2:2005 [162] para áridos ligeros con una densidad de partículas no superior a 2000 kg/m<sup>3</sup> (2 g/cm<sup>3</sup>) o una densidad aparente no superior a 1200 kg/m<sup>3</sup>(1.20 g/cm<sup>3</sup>). Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 24. Resultado de densidad partículas ( $\rho_a$ ); secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ ); saturadas y secadas superficialmente ( $\rho_{ssd}$ ); absorción de agua ( $W_{A24}$ ) de los granulados NFU's.*

<b>Muestra</b>	<b>M<sub>4</sub> (g)</b>	<b>M<sub>3</sub> (g)</b>	<b>M<sub>2</sub> (24hr)(g)</b>	<b>M<sub>1</sub> (g)</b>	<b><math>\rho_a</math> (g/cm<sup>3</sup>) partículas</b>	<b><math>\rho_{rd}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\rho_{ssd}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>W_{A24}</math> (%)</b>
S <sub>2</sub>	22.51	146.86	148.51	23.61	1.08	1.02	1.07	4.89
	22.51	144.88	146.55	23.05	1.08	1.05	1.08	2.40
S <sub>3</sub>	22.51	146.73	149.77	25.12	1.15	1.02	1.14	11.59
	22.51	145.65	148.39	25.54	1.14	0.99	1.12	13.46
S <sub>4</sub>	50.26	425.30	425.48	52.98	1.00	0.95	1.00	5.41
	50.26	405.28	405.49	53.70	1.00	0.94	1.00	6.84
S <sub>5</sub>	50	419.85	424.20	54.15	1.09	1.00	1.09	8.30
S <sub>6</sub>	50	399.15	402.91	53.16	1.08	1.01	1.07	6.32
	40	419.76	422.25	42.70	1.06	0.99	1.06	6.75
	50	399.30	403.29	52.98	1.08	1.02	1.08	5.96
S <sub>7</sub>	49.83	399.30	400.56	55.77	1.02	0.91	1.02	11.92
	49.96	419.76	422.18	54.58	1.05	0.96	1.04	9.25
	49.86	399.3	401.90	53.66	1.05	0.97	1.05	7.62

La gravedad específica o densidad de la partícula de las virutas de NFU's (20-50mm) se encuentra en el rango de 1.10 a 1.30 g/cm<sup>3</sup> o 11-13 kN/m<sup>3</sup> [108], [147], [163]–[165], con valores mayores en las piezas que contienen correas de acero. En esta investigación se encontraron valores entre 1.00-1.15 g/cm<sup>3</sup> o 10-15 kN/m<sup>3</sup>, valores muy similares en el conjunto de las muestras evaluadas y similares a las investigaciones anteriores. Se observa baja dispersión de los datos.

Para calcular la absorción de las partículas de NFU's se realizó el procedimiento que se describe en la norma UNE-EN 1097-6: 2014 [157]. El secado en horno se realizó por periodos mayores a 24 h. a una temperatura de 80° C, en base a investigaciones pasadas,

en las que los granulados de NFU's parecen no perder peso de la parte sólida [71]. Se tomaron varios pesos hasta obtener una lectura constante. Para ello, hubo que secar superficialmente los trozos tras la saturación del granulado de NFU's, evitando que el agua retenida en su superficie desvirtuara el resultado final, como ocurre en la determinación de la absorción de agua.

Los resultados de absorción presentan valores entre 2-13%, valores similares a los reportados en otras investigaciones, con tamaños de partícula superiores (50, 50-100, 100-200 y 200-300 mm), rangos entre 6.7 y 7% [143]. Las investigaciones de By J. H. Lee (1999) [147] registraron absorciones del 1-2.5% para partículas de 300 mm. En general, las piezas de NFU's tienen una baja cantidad de absorción y baja capilaridad, probablemente debido a la impermeabilidad del caucho [166].

#### 7.6.3. Relación entre el índice de huecos y la densidad aparente para los granulados de NFU's.

En el análisis de porosidad y huecos vacíos, al igual que en los suelos utilizados para rellenos, los granulados de NFU's presentan una fase sólida, una líquida (agua absorbida o externa a las partículas) y una gaseosa (huecos vacíos). No obstante, en los NFU's la fase gaseosa es más compleja que en otros materiales de relleno convencionales, ya que el volumen de los huecos vacíos exteriores presenta más importancia que las partículas constituyentes, característica de los materiales ligeros (Ver ilustración 19). Según las investigaciones de Tommy Edeskär (2006) [80] la porosidad de los fragmentos de NFU's es alta, con rangos entre el 62% para las condiciones de relleno suelto y el 45% después de la compactación Próctor Modificado.

Una de las diferencias más notorias entre los suelos convencionales y el granulado de NFU's son las densidades aparentes o en su defecto el peso específico, que se refleja en el volumen ocupado por la muestra. El peso específico a granel de las muestras puede llegar a medir entre 530 y 600 kg/m<sup>3</sup>, casi cinco veces menor que la arena. En esta investigación se obtuvieron valores inferiores, del rango de 430-450 kg/m<sup>3</sup>. Por tanto, el caucho granulado se puede considerar una fuente de áridos liviana debido a su bajo

peso específico, que lo distingue de otras fuentes de materiales reciclados utilizados en rellenos [101].

En medios granulares, la cuantificación de los huecos vacíos en cuanto al volumen de la muestra se realiza mediante la densidad aparente y la densidad de la partícula (Ver tabla 25).

*Tabla 25. Resultado de densidad aparente de la muestra ( $\rho_b$ ); partículas ( $\rho_a$ ); porcentaje de huecos ( $v$ ) de los granulados NFU's.*

<b>Muestr a</b>	<b><math>M_2</math> (g)</b>	<b><math>\rho_b</math> (g/cm<sup>3</sup>) conjunto</b>	<b><math>\rho_a</math> (g/cm<sup>3</sup>) partícula</b>	<b><math>v</math> (%)</b>	<b>Ilustración 19</b> <i>Ensayo de densidad aparente del conjunto y porcentaje de huecos del granulado de NFU's.</i>
$S_2$	1446.50	0.45	1.00	54.74	
	1452.40	0.46	1.01	54.76	
	1446.40	0.45	1.02	55.40	
	1445.00	0.45	1.00	54.97	
	1438.70	0.45	1.07	58.28	
	1436.30	0.44	1.00	55.71	
	1437.80	0.44	1.01	56.12	
	1433.10	0.44	1.02	56.64	
$S_3$	1422.60	0.43	1.07	59.71	
	1426.70	0.43	1.07	59.58	
	1425.40	0.43	1.00	56.59	
	1428.60	0.44	0.98	55.30	
$S_4$	1445.40	0.45	0.95	52.51	
	1443.60	0.45	0.94	52.31	
	1442.80	0.45	1.03	56.25	
	1444.70	0.45	1.05	56.84	

Se observan altos porcentajes de vacíos en las muestras, valores similares a los obtenidos en investigaciones anteriores. Por lo tanto, se confirma que los granulados de NFU's requieren una precarga o presión de confinamiento, para evitar o minimizar las deflexiones que pudieran presentarse.



## 7.7. *Propiedades mecánicas*

### 7.7.1. Compactación (Ensayo Próctor)

Las pruebas Próctor estándar y modificado (de compactación) se realizaron para determinar el contenido de humedad óptimo y densidades. Estas pruebas son esenciales, ya que la estabilidad y el asentamiento de una estructura de relleno, como el terraplén de una carretera y el estribo de un puente, dependen de lo bien compactado que esté el material de relleno. La característica de compresibilidad de los granulados se encuentra fuertemente ligada a la compacidad que poseen. Para el caso de los granulados de NFU's, su elevada compresibilidad se debe a las propiedades elásticas del caucho, que es el principal componente de los neumáticos. Debido a su geometría tórica y elasticidad, los NFU's son difícilmente compactables [99]. Este hecho obliga al conocimiento detallado de la compresibilidad del granulado de NFU's, para evitar asientos inesperados en las puestas en marcha [167].

Se han determinado las características de compresibilidad de las muestras de granulado de NFU's de acuerdo a la norma UNE-EN 13286-2:2011 [168]. El ensayo radica en compactar una fracción del material en un cilindro con un volumen conocido, variando únicamente su humedad, para que se obtenga su punto de compactación máxima. Se puede definir la compacidad como la comparación cuantitativa de las densidades secas o pesos unitarios secos que el granulado NFU's va adquiriendo gradualmente al variar la humedad, la energía o el método de compactación.

Magdalena Kowalska 2016 [169] afirma que se requieren contenidos altos de humedad para la obtención de densidades secas máximas, anunciando resultados de hasta un 40% en granulometrías de 0,1–1 mm. En la presente investigación se estudiaron incrementos del 5% en el contenido de agua, introducido a través del peso del material, entre el 5% y el 60% de los granulados de NFU's.



*Ilustración 20. Montaje y desmontaje del ensayo de Próctor de los granulados NFU's (Muestra S7).*

Se observó que el contenido de agua repercute en el acomodo de las partículas y la interacción entre ellas, reduciendo así la fricción y aumentando la trabajabilidad. Hasta un 20% de contenido de agua ayuda a la trabajabilidad; sin embargo, para valores más altos, el agua evacua fuera del molde de prueba (ilustración 20). Se pudo observar que los aumentos del contenido de agua no aumentan las densidades secas (ver ilustración 21).

Se afirma que el contenido de agua y el origen de los neumáticos no son factores determinantes en el comportamiento de las mezclas, tienen un efecto menor en la densidad aparente de los fragmentos de NFU's [80], [170]. Las muestras no se ven afectadas por el método de compactación, sólo se requiere un mínimo esfuerzo para alcanzar su peso unitario máximo [129].

La diferencia del esfuerzo de compactación de modificado con respecto al estándar no tiene efecto en las curvas de compresión de los NFU's [171]. Dado que el nivel de energía aplicado no es crítico, algunas investigaciones recomiendan el 60% del esfuerzo de compactación estándar de próctor [108]. En esta investigación no se observaron diferencias en los resultados en relación a la energía de compactación. Se observan incrementos de tan solo el 3-4% del próctor modificado al estándar. Al igual que en otras investigaciones donde los resultados para el 60% estándar fueron  $6.21 \text{ kN/m}^3$ ; 100% estándar  $6.26 \text{ kN/m}^3$ ; modificado  $6.71 \text{ kN/m}^3$ . Se observa que las diferencias en relación a la energía de compactación en los resultados son despreciables, confirmando así que las energías de compactación tienen poca influencia en las densidades máximas obtenidas [172].

Algunas investigaciones afirman que las densidades secas de los suelos arcillosos y arenosos mezclados con NFU's (en cualquier tamaño) disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. Este hecho hace que los granulados de NFU's sean un material factible para su uso como material de relleno ligero [172]–[174]. Las curvas próctor reportadas indican que las densidades máximas son más altas para el suelo y disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de trituración de NFU's, tanto finos como gruesos [175].

Los resultados obtenidos en otras investigaciones registran densidades secas alcanzadas tras la compactación en laboratorio de partículas de granulados de NFU's entre  $4.2\text{-}6.10 \text{ kN/m}^3$  [71], [80], [153], [170], [173]. Los resultados de la prueba de compactación para esta investigación de los diferentes porcentajes de partículas que se han verificado y comparado revelan valores similares, por lo que se establece un rango de valores que va desde  $5.39 \text{ kN/m}^3$  como mínimo hasta  $6.03 \text{ kN/m}^3$  como máximo. En ninguna de las seis mezclas evaluadas se observa una línea de tendencia clara en la curva de humedad, ni

tampoco se puede encontrar una tendencia en la curva de secado, como se muestra en las ilustraciones 22 y 23.

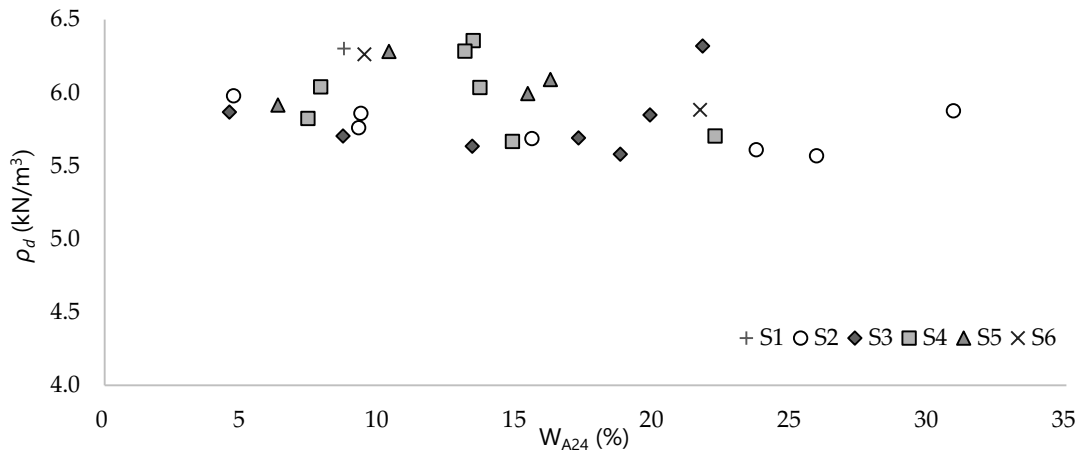


Ilustración 21. Resultados del ensayo de próctor de los granulados NFU's para el conjunto de muestras.

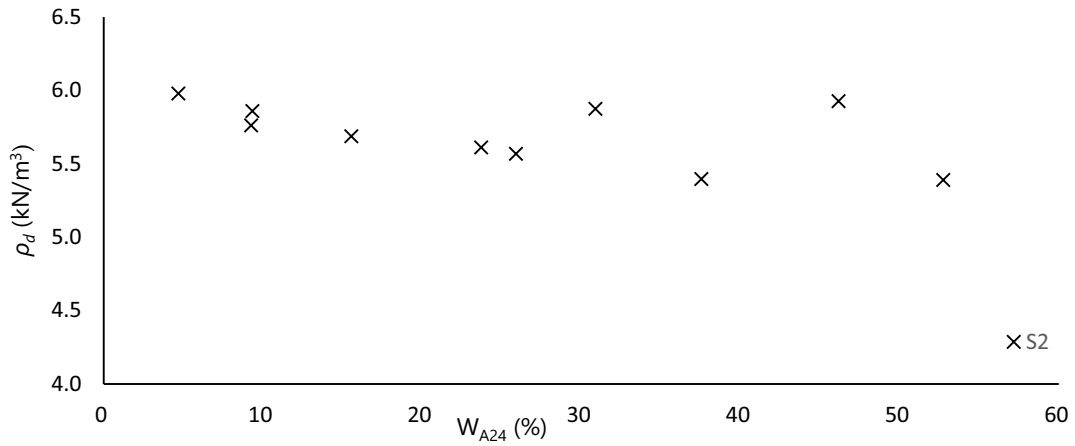


Ilustración 22. Resultados del ensayo de próctor de los granulados NFU's para la muestra S<sub>2</sub>.

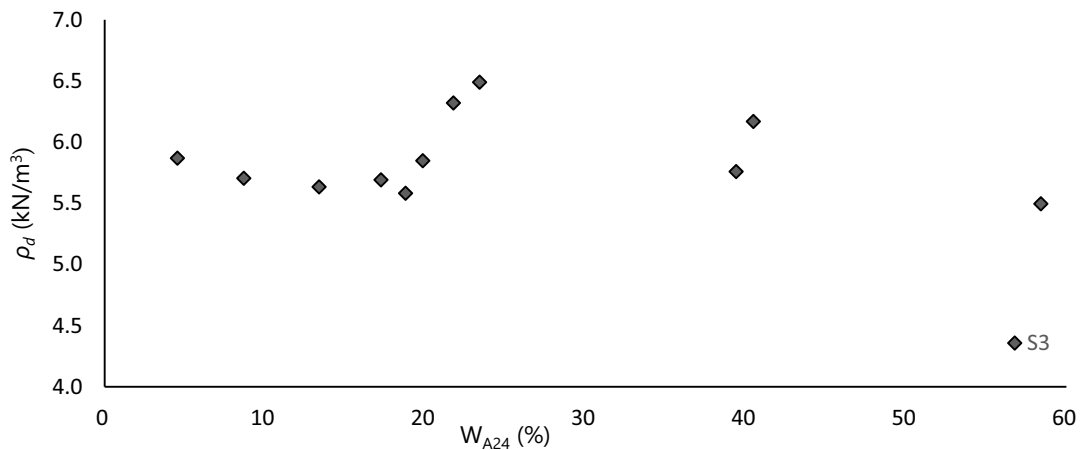


Ilustración 23. Resultados del ensayo de próctor de los granulados NFU's para la muestra S<sub>3</sub>.

### 7.7.2. Corte directo

Se realizaron pruebas consolidadas de cizallamiento directo no drenado (o pruebas consolidadas rápidas,  $Q_c$ ). Al igual que en otros estudios [82], se fijó una tasa de desplazamiento mínima para determinar la resistencia al cizallamiento y las características de deformación vertical o volumétrica del granulado de NFU's. Se elaboraron seis probetas para cada muestra evaluada, se ensayaron siete distribuciones de tamaño de partícula, con diferentes tensiones normales verticales: 100, 200 y 300 kPa, de acuerdo con la normativa UNE-EN ISO 17892-10:2018 [176]. Se empleó un equipo de cizalla directa con cajas de cizalla circulares de 50 mm de diámetro y de 25 mm de altura (ver ilustración 24).

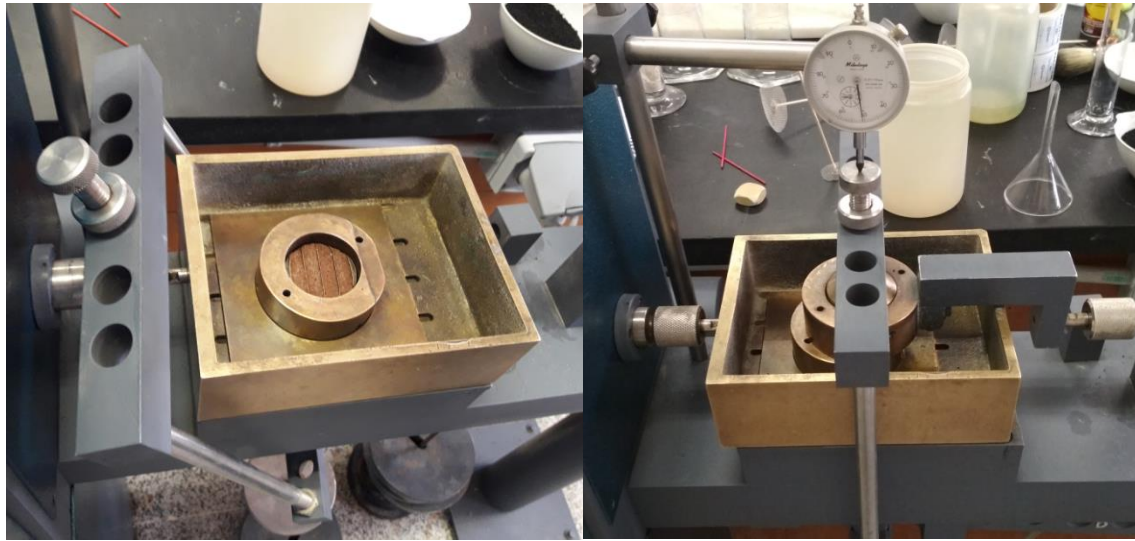
La compactación de los granulados de NFU's tiene un efecto de compresión sobre los mismos, entendiendo que la compactación aumenta la resistencia al cizallamiento. En esta investigación, las muestras se compactaron hasta alcanzar el peso unitario seco correspondiente para un tamaño de partículas determinado. Utilizando el martillo de compactación modificado, se colocó la muestra de 30 gr en dos capas, 15 golpes por capa.

Previamente se analizó la influencia de la velocidad y el equipo de corte en la elaboración de las pruebas (Ver tabla 26), siendo estos factores determinantes para la correcta obtención de resultados. Se observó que la diferencia de equipos provoca discrepancia en los resultados. Tratándose de la misma velocidad y muestra, se decidió realizar todas las pruebas en un mismo equipo. Por otro lado, se comprobó que velocidades mayores a 0,6 mm/min no permiten alcanzar desplazamientos para que se produzca el corte de la muestra o en su defecto esfuerzos cortantes continuos respecto a los desplazamientos horizontales (ver ilustración 26). Por último, se visualizó que velocidades lentas producen aumentos en los valores de la cohesión debido al acomodo de las partículas al tratarse de una muestra granular y reajuste de las piezas, sin arrojar resultados claros. El ángulo de rozamiento se mantuvo en valores similares. Por todo ello se decide fijar una tasa de desplazamiento de 0,6 mm/min.

*Tabla 26. Resultados previos de la cohesión y del ángulo de fricción de las combinaciones de granulado de NFU's.*

MUESTRA	VELOCIDAD mm/min	COHESIÓN c (kPa)	ÁNGULO DE ROZAMIENTO $\phi$ (°)	CONSIDERACIONES
$S_1$ (0.0-0.8 mm)	0.30	15.98	19.36	VELOCIDAD 0,30 mm/min despl 5.4 mm (6%)
$S_4$ (2.0-7.0 mm)	0.30	14.39	17.98	VELOCIDAD 0,30 mm/min despl 5.4 mm (6%)
	0.30	13.90	18.18	
$S_2$ (0.6-2.0 mm)	0.12	31.68	23.74	EQUIPO CORTE, MAQUINA 1. cambio en fuerza= div (0,146Kp)
$S_2$ (0.6-2.0 mm)	0.12	67.00	17.86	EQUIPO CORTE, MAQUINA 2. cambio en fuerza= div (0,12 Kp)

Siempre que esté comprendido entre 25 y 100 mm, el tamaño de las piezas parece no afectar a los parámetros de cohesión, ángulos de rozamiento y módulos de deformabilidad de los trozos de NFU's [99]. Según las investigaciones de Moo-Young et al. (2003) [143] el aumento del tamaño de los fragmentos de NFU's incrementa la resistencia al cizallamiento. Las mezclas con un contenido de caucho del 30% muestran la menor relación de vacíos para una tensión baja [177]. Utilizando el criterio de fallo de Mohr-Coulomb, se obtiene el esfuerzo cortante máximo que pueden soportar los granulados de NFU's. No se observó ningún pico de tensión de cizallamiento, y por ello se decidió establecer el fallo con una deformación horizontal igual al 15% del diámetro de la muestra (10 mm). Las curvas de esfuerzo cortante versus desplazamiento horizontal se muestran en la ilustración 25. En general, las mezclas muestran comportamiento de endurecimiento por tensiones, es decir, no hubo caídas claras, por lo tanto, no hubo picos pronunciados (puntos de falla) en las pendientes de las curvas. Se apreció un ligero corte en la muestra  $S_6$  para una tensión normal vertical de 300 kPa.



*Ilustración 24 Equipo de Corte directo, caja de cizallamiento.*

Elizabeth Contreras Marín  
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS:  
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU'S)

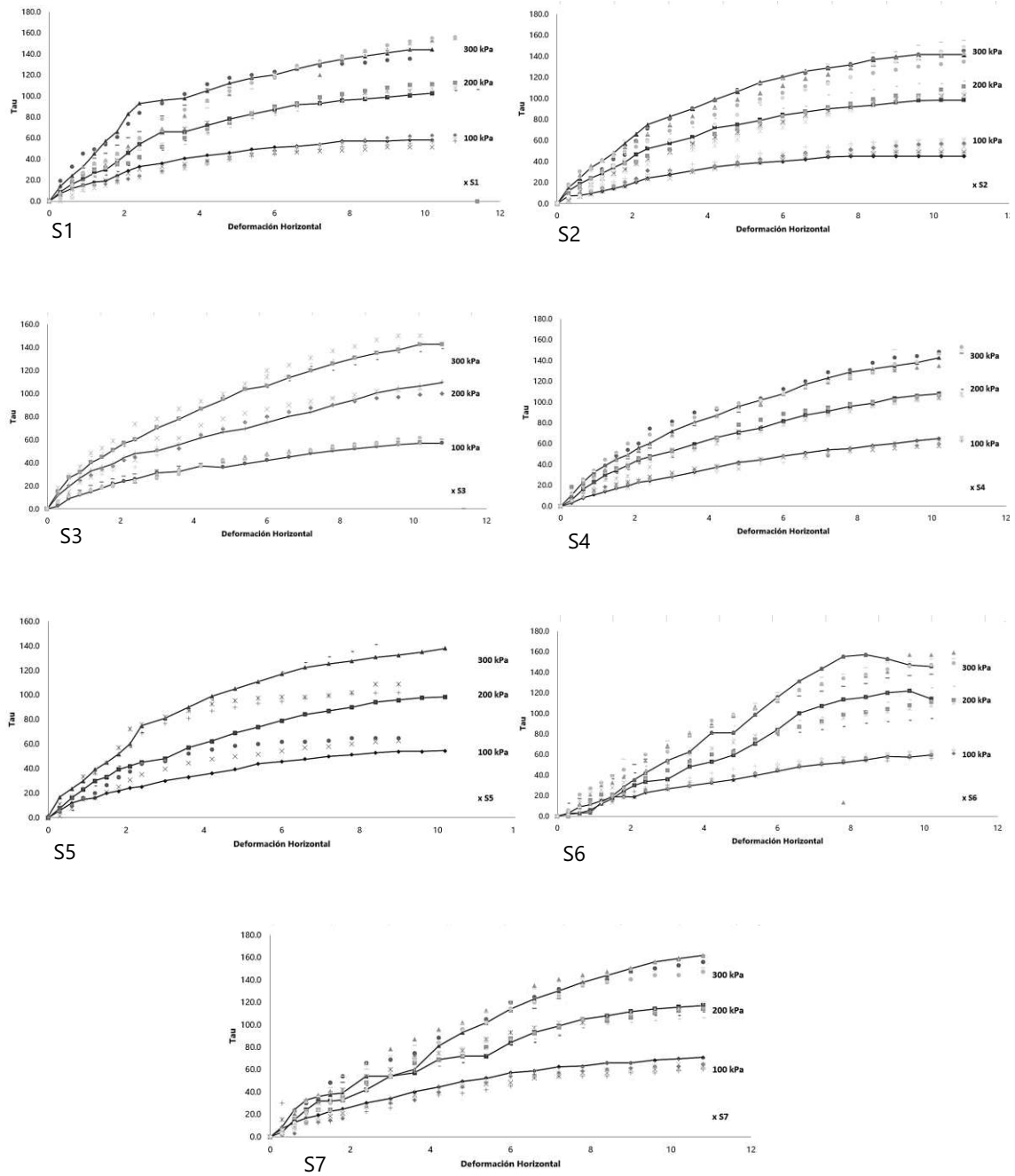


Ilustración 25. Gráfico de deformaciones horizontales contra esfuerzos tangenciales individuales de muestras de granulados de NFU's.



Elizabeth Contreras Marín  
 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS:  
 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU'S)

Tabla 27. Valores resultantes de la cohesión y del ángulo de fricción de las combinaciones de granulado de NFU's.

MUESTRA	COHESIÓN c (kPa)	ÁNGULO DE ROZAMIENTO $\phi$ (°)	ECUACIÓN	
S1	1	15.78	23.60	$y = 0,4369x + 15,784 R^2 = 0,9996$
	2	12.19	23.45	$y = 0,4338x + 12,188 R^2 = 0,9767$
	3	16.58	23.60	$y = 0,4369x + 16,583 R^2 = 0,9941$
	4	18.18	25.05	$y = 0,4674x + 18,181 R^2 = 0,9983$
	5	10.39	26.33	$y = 0,4949x + 10,389 R^2 = 0,9999$
	6	13.99	25.34	$y = 0,4735x + 13,986 R^2 = 0,9997$
S2	1	1.60	26.19	$y = 0,4919x - 1,5984 R^2 = 0,9963$
	2	2.80	25.91	$y = 0,4857x + 2,7971 R^2 = 0,9953$
	3	1.00	20.18	$y = 0,3675x + 1 R^2 = 0,9206$
	4	8.39	26.47	$y = 0,498x + 8,3914 R^2 = 0,999$
	5	18.78	23.45	$y = 0,4338x + 18,781 R^2 = 0,9767$
	6	16.38	22.41	$y = 0,4124x + 16,383 R^2 = 0,9849$
	7	17.18	25.48	$y = 0,4766x + 17,182 R^2 = 0,9894$
	8	25.97	23.16	$y = 0,4277x + 25,974 R^2 = 0,9983$
	9	17.78	24.04	$y = 0,446x + 17,782 R^2 = 0,9997$
S3	1	8.99	30.52	$y = 0,5896x - 8,9908 R^2 = 0,9935$
	2	24.98	22.41	$y = 0,4124x + 24,975 R^2 = 0,9887$
	3	20.18	22.56	$y = 0,4155x + 20,179 R^2 = 0,972$
	4	18.18	22.86	$y = 0,4216x + 18,181 R^2 = 0,9997$
	5	11.78	25.20	$y = 0,4705x + 11,788 R^2 = 0,9998$
	6	19.98	22.86	$y = 0,4216x + 19,98 R^2 = 0,9999$
	7	26.57	22.11	$y = 0,4063x + 26,573 R^2 = 0,9901$
S4	1	28.77	21.36	$y = 0,391x + 28,771 R^2 = 0,9971$
	2	12.79	24.76	$y = 0,4613x + 12,787 R^2 = 0,9996$
	3	23.58	23.01	$y = 0,4246x + 23,576 R^2 = 0,991$
	4	23.58	21.66	$y = 0,3971x + 23,576 R^2 = 0,9868$
	5	21.98	23.89	$y = 0,443x + 21,978 R^2 = 0,9996$
	6	22.98	23.16	$y = 0,4277x + 22,977 R^2 = 0,9983$
S5	1	37.56	30.32	$y = 0,3544x + 37,562 R^2 = 0,9835$
	2	13.59	23.01	$y = 0,4246x + 13,586 R^2 = 0,9992$
	3	12.19	26.75	$y = 0,5041x + 12,188 R^2 = 0,9979$
	4	20.38	23.45	$y = 0,4338x + 20,379 R^2 = 0,9947$
	5	5.79	26.33	$y = 0,4949x + 5,7941 R^2 = 0,9968$
	6	16.98	25.34	$y = 0,4735x + 16,983 R^2 = 0,9997$
	7	13.59	23.01	$y = 0,4246x + 13,586 R^2 = 0,9992$
S6	1	52.10	27.61	$y = 0,2108x + 52,147 R^2 = 0,8459$
	2	15.99	26.47	$y = 0,498x + 14,985 R^2 = 0,9752$
	3	17.78	26.47	$y = 0,498x + 17,782 R^2 = 0,9831$
	4	14.79	22.56	$y = 0,4155x + 14,785 R^2 = 0,9988$
	5	13.19	26.47	$y = 0,498x + 13,187 R^2 = 0,999$
	6	21.58	23.60	$y = 0,4369x + 21,578 R^2 = 0,9963$
	7	26.37	24.18	$y = 0,4491x + 26,373 R^2 = 0,9523$
S7	1	25.37	24.91	$y = 0,4644x + 25,374 R^2 = 0,9999$
	2	18.18	25.34	$y = 0,4735x + 18,181 R^2 = 0,996$
	3	8.99	27.44	$y = 0,5193x + 8,9908 R^2 = 1$
	4	16.38	26.33	$y = 0,4949x + 16,383 R^2 = 0,9999$
	5	27.97	22.71	$y = 0,4185x + 27,971 R^2 = 0,9682$
	6	27.37	22.41	$y = 0,4124x + 27,372 R^2 = 0,9978$

\* Repetición de pruebas, valores descartados para la evaluación de parámetros de valores característicos.

Se encontraron las envolventes de fallo de Mohr-Coulomb para distintos tamaños de partícula (ilustración 26 y 27), en las que se indica que de manera general, todas las muestras presentan valores similares. Cabe destacar que las mezclas  $S_6$  (50% 2.0-7.0mm + 50% 0.6-2.0 mm) y  $S_7$  (33% 2.0-7.0mm + 33% 0.6-2.0 mm + 33% 0.0-0.8 mm) tienen los parámetros de resistencia al corte más altos, debido a la mejora de la distribución granulométrica. Se entiende que un mejor acomodo de las partículas repercute en la resistencia exhibida. Este fenómeno es atribuido principalmente a la mejora de los contactos entre partículas, que a su vez altera el ángulo de fricción aparente y mejora la cohesión. Sin embargo, estas mejoras no se consideran significativas en relación al rango de valores obtenidos. La variación del ángulo de fricción interna y la cohesión de los diferentes tamaños de partícula estudiados fue una variación no lineal, sin mostrar un comportamiento de tendencia predecible.

En general, los resultados del valor del ángulo de fricción interno oscilaron entre  $21^\circ$ - $28^\circ$ , mientras que la cohesión presentó una dispersión mayor de valores entre 1-29 kPa (ver ilustración 27-28). Estos resultados concuerdan con investigaciones del mismo rango de tamaño de partícula, con valores entre  $15^\circ$ -  $29^\circ$  y 0-12 kPa respectivamente [128], [153], [170], [173], [178]. Se encontraron pocas investigaciones que obtuvieran valores superiores a los antes mencionados. Se ha observado en otras granulometrías (>12mm) que cuando aumentan las deformaciones de 10 al 20%, los valores aumentan de  $6^\circ$  a  $15^\circ$  y de 70 kPa a 82 kPa [179]. Tommy Edeskär (2006) [80] señala que para un ángulo de fricción de  $39^\circ$  se requieren deformaciones significativas para desarrollar la cohesión (>20%), condiciones que en la mayoría de los equipos de corte directo en laboratorio no pueden producirse.

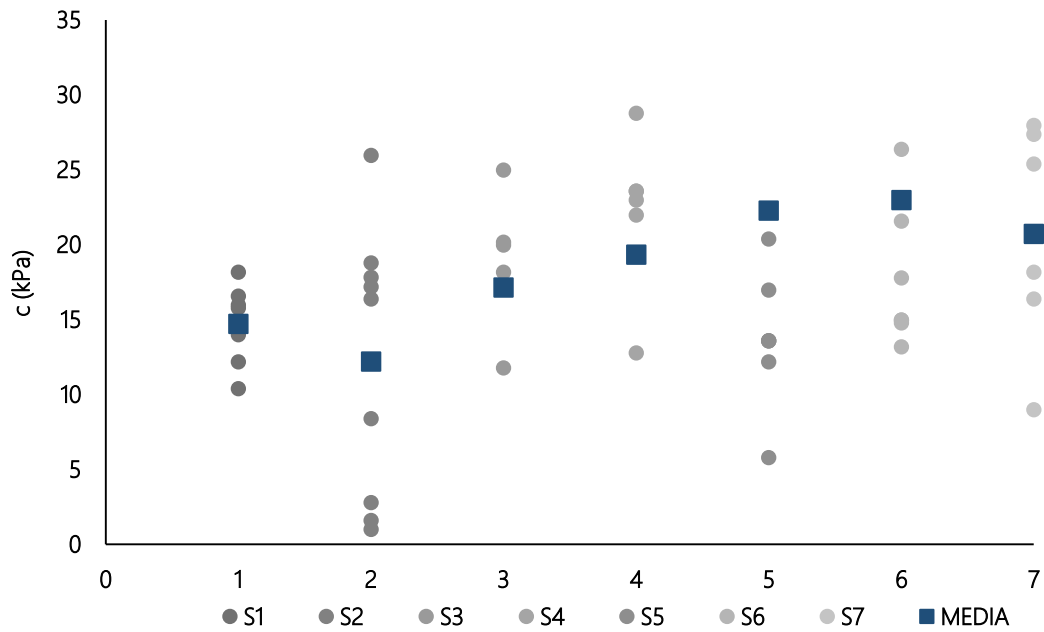


Ilustración 26. Dispersión de la cohesión de las combinaciones de granulado de NFU's.

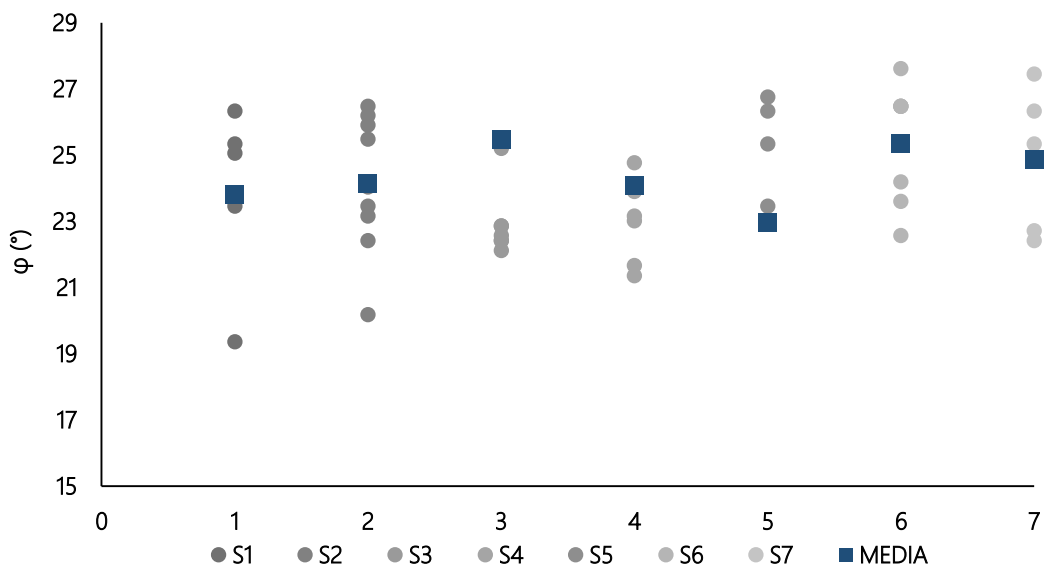


Ilustración 27. Dispersión del ángulo de fricción de las combinaciones de granulado de NFU's.

### 7.7.3. Edometría

La compresibilidad del material (o la capacidad de aumentar / disminuir en volumen cuando se somete a una carga aplicada) es uno de los factores más importantes requeridos en las consideraciones de diseño [170]. La elevada compresibilidad del NFU's en parte se debe a las características elásticas del caucho, que es el principal componente

de los neumáticos [77, p. 18], [97]. Por ello se requiere el conocimiento detallado de la compresibilidad del troceado de NFU's. Se ha evaluado dicha compresibilidad de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 17892-5:2019 [180] a través de una campaña de ensayos edométricos para las muestras representativas del conjunto de datos:  $S_5$  (90% 2,0 – 7,0 + 10% 0,6 – 2,0 mm) y  $S_6$  (50% 2,0 – 7,0 + 50% 0,6 – 2,0 mm), muestras que presentaron mejor desempeño en los ensayos preliminares.

Las presiones novalas a las que se sometieron las muestras fueron; 5,10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 kPa, empleando ciclos de carga-descarga completos y ciclos intermedios de descarga-recarga entre presiones intermedias. Se utilizaron cuatro escalones de descarga. Las probetas se compactaron hasta conseguir el 100% de la energía Próctor y el contenido óptimo de humedad (Ver ilustración 28). En otras investigaciones se ha detectado un aumento del índice de compresión ( $C_c$ ) y del índice de hinchamiento ( $C_s$ ) en las mezclas suelo–NFU's, debido al menor módulo de cizallamiento del caucho [153], [181]. De acuerdo con las investigaciones de Imtiaz Ahmed y C. W. Lovell [171], la compresión total de las muestras de NFU's se debe principalmente a tres mecanismos:

- La compresión debida al reordenamiento/deslizamiento de las partículas que produce una pequeña compresión, principalmente durante el primer ciclo de carga.
- La compresión debida a la flexión o aplanamiento de las partículas, responsable de la mayor parte de la compresión total y recuperable en su mayor parte durante la descarga.
- La compresión debida a la deformación elástica de las piezas, una pequeña compresión debida a este mecanismo y recuperable en su totalidad.

Esto indica que la compresión de las partículas de NFU's puede reducirse aumentando las presiones de confinamiento y sobrecarga o rellenando los huecos de aire con material menos compresible, por ejemplo en las combinaciones de suelo-NFU's.



*Ilustración 28. Preparación y montaje de ensayos edométricos del granulado de NFU's.*

Previamente se analizó la influencia del equipo edométrico en la elaboración de las pruebas (Ver ilustración 29). Se obtuvieron comportamientos similares, las curvas presentaban tendencias paralelas en el conjunto de los datos.

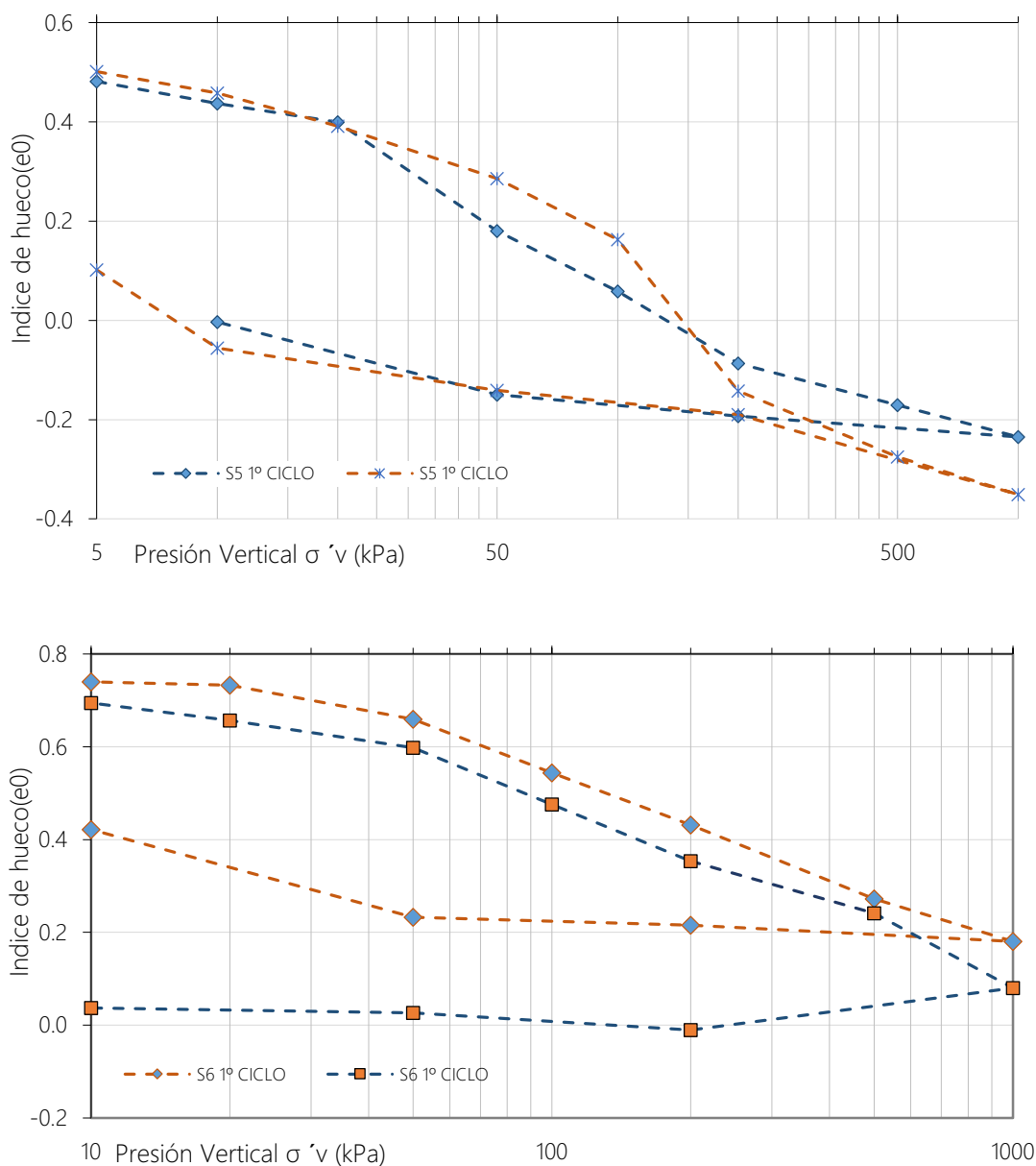


Ilustración 29. Comparación de curvas edométricas de los granulados NFU's para la muestras S<sub>5</sub> y S<sub>6</sub>.

En las investigaciones de Ignacio San Martín (2009) [91] se indica que la compresibilidad de los NFU's troceados es independiente de su granulometría y de su grado de saturación. Se menciona que las muestras saturadas sufren una fricción similar a las muestras secas, lo que significa que la presencia de agua no reduce el coeficiente de rozamiento entre la muestra y la celda edométrica. La variación en los tamaños de las partículas de NFU's tiene poca influencia en la respuesta de carga-deformación para esfuerzos de compactación [171].

Se ha demostrado que los granulados de NFU's presentan una deformación mucho más elástica que el suelo, varias veces inferiores a los valores habituales, lo que confiere al residuo un nivel de compresibilidad muy elevado [91] [182]. Su curva de tensión-deformación es casi reversible cuando se libera la tensión, y su módulo de Young presenta valores extremadamente bajos en comparación con el suelo [182]. En los ensayos realizados en esta investigación se observaron dos comportamientos claros en las curvas noval: por un lado, se aprecian ramas de carga-descarga con deformaciones permanentes irrecuperables, y por otro lado se observan que las ramas son casi paralelas entre sí, independientemente de la carga noval de origen (ver ilustración 31).

Con la finalidad de estudiar la evolución de los módulos edométricos se realizaron ciclos de carga-descarga. En total se llevaron a cabo tres muestras para diferentes ciclos de carga-descarga, en tres equipos diferentes. Las pruebas de carga cíclica mostraron que la compresión es mayoritariamente plástica, presentando disminuciones significativas con el aumento de los niveles de tensión. Sin embargo, la precarga dada por el ciclo anterior genera una ligera acumulación de deformaciones en el primer ciclo de carga (ver ilustración 30). Algunas investigaciones afirman que en el proceso de diseño se debe incluir una capa de suelo convencional cuyo espesor sea suficiente para generar un precarga que evite las deformaciones superficiales [102]. Por este motivo el departamento de transporte de EUA [107] recomienda un espesor mínimo de suelo sobre la capa de NFU's de 0.9 m (3 pies).

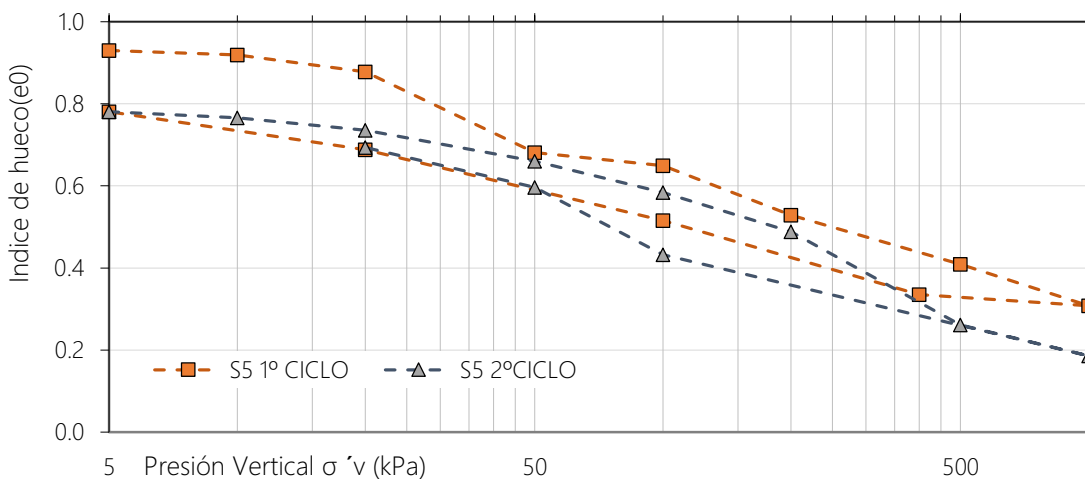
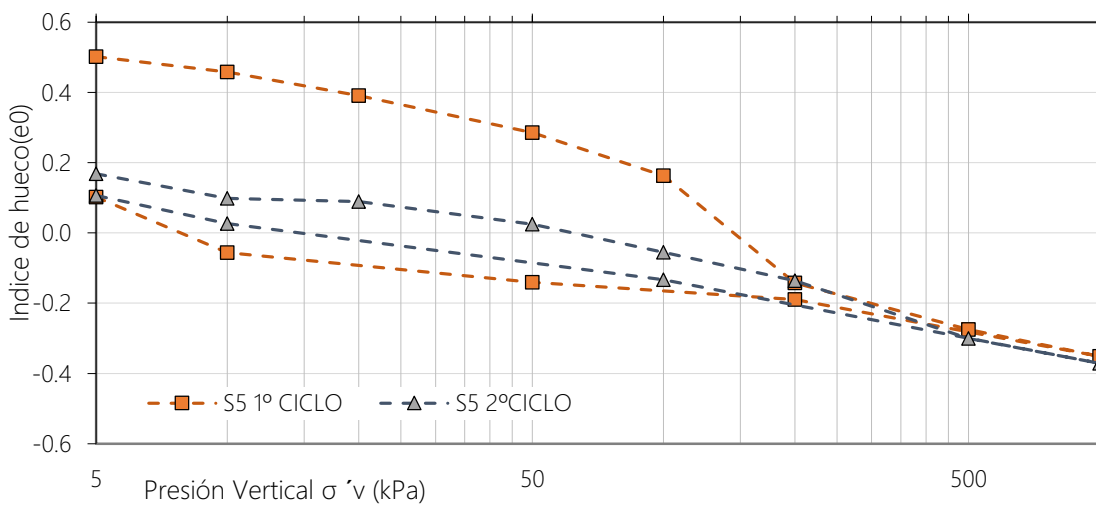
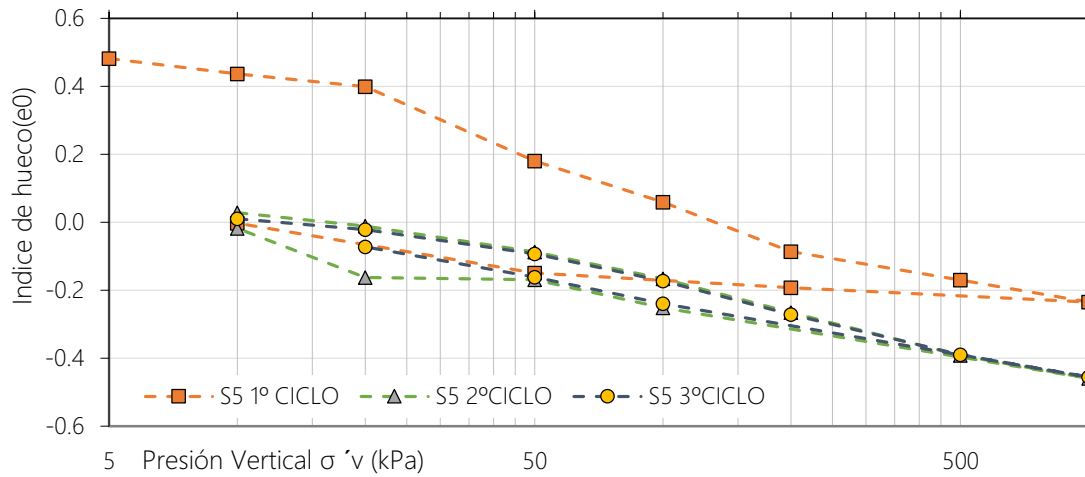


Ilustración 30. Ciclos de carga y descarga edométricos de los granulados NFU's para la muestras S5.

La forma de la curva edométrica de las muestras evaluadas fue muy similar a las obtenidas en otras investigaciones con este tipo de granulometrías (<12 mm) [91], [170], [171], [177], [183]. Los fragmentos de NFU's más pequeños tienen una respuesta inicial



de tensión-deformación más rígida en comparación con los más grandes y la compresibilidad aumenta con el aumento del tamaño de los fragmentos de NFU's [80].

Se comprobó que el comportamiento de tensión-deformación de los ciclos es muy similar. Se destaca que la deformación de la muestra ante distintas cargas aplicadas es independiente del ciclo evaluado, y que la mayoría de las deformaciones se encuentran en el rango elástico. Las deformaciones verticales finales (1000 kPa) presentan valores entre 32 y 64%(Ilustración 31). Estos valores son muy similares a los deducidos en estudios anteriores de muestras de TDA (12-305 mm) [71], [99], [104], [153], [177]. Sin embargo, estas deformaciones son muy grandes comparadas con las que se suelen obtener en los estudios de compresibilidad del suelo.

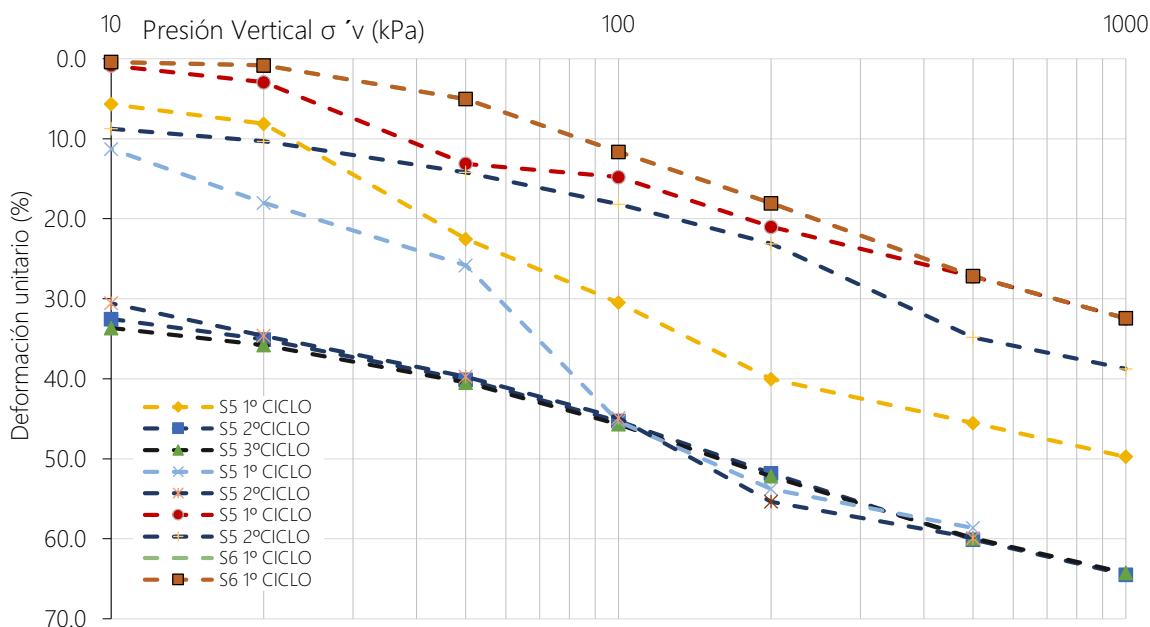


Ilustración 31. Presiones verticales vs Deformaciones unitarias, ensayo edométrico de los granulados NFU's para la muestras S5 y S6.

En otras investigaciones de partículas inferiores a 12mm, los resultados del índice de compresión ( $C_c$ ) y del índice de hinchamiento ( $C_s$ ) presentan valores de 0.30-0.78 y 0.18-0.45 [71], [153], [181]. En esta investigación se encontraron valores similares del rango de 0.21-0.44 y 0.18-0.32 respectivamente (Ver tabla 28). Se asemejan a los valores de arcillas altamente compresibles.

*Tabla 28. Resultados del análisis de compresibilidad de las muestras S<sub>5</sub> y S<sub>6</sub> del granulado de NFU's. Ensayo Edométrico.*

MUESTRA	índice de compresión Cc	índice de hinchamiento Cs	Deformación volumétrica final ε <sub>v,f</sub>	Coef. De Poisson ν	Módulo Edométrico E <sub>m</sub> (kPa)	Módulo de Elasticidad E' (kPa)
<i>Edo 1 S5 ciclo 1</i>	0.37	0.14	49.75	0.38	1048.77	569.88
<i>Edo 1 S5 ciclo 2</i>	0.26	0.23	64.48	0.38	1536.10	834.69
<i>Edo 1 S5 ciclo 3</i>	0.26	0.24	64.26	0.38	1536.10	834.69
<i>Edo 2 S5 ciclo 1</i>	0.44	0.18	58.64	0.38	513.48	279.02
<i>Edo 2 S5 ciclo 2</i>	0.27	0.18	59.90	0.38	1934.24	1051.03
<i>Edo 3 S5 ciclo 1</i>	0.34	0.23	32.45	0.38	1610.31	875.02
<i>Edo 3 S5 ciclo 2</i>	0.32	0.32	38.75	0.38	2020.20	1097.75
<i>Edo 3 S5 ciclo 3</i>	0.21	0.21	59.06	0.38	1951.22	1060.26
<i>Edo 1 S6 ciclo 1</i>	0.36	0.26	43.36	0.38	1554.00	853.24
<i>Edo 1 S6 ciclo 1</i>	0.33	0.25	32.44	0.38	1557.63	855.23

Los análisis de compresibilidad de las astillas de NFU's (12-50mm) indican que el módulo de elasticidad es del orden de 2 a 3 veces menor que el módulo del suelo granular [108] [184], En un rango de valores entre 700-1250 kPa. Los datos obtenidos en esta investigación indican que para la muestra S<sub>5</sub> hay un aumento del módulo de elasticidad del primer al segundo ciclo de carga, el tercer ciclo se mantiene igual o disminuye. Sin embargo, los valores del módulo del conjunto de las muestras son considerablemente inferiores a los valores obtenidos para los suelos convencionales. A una presión de confinamiento de 100 kPa, el módulo de elasticidad presenta valores entre 279.02-1097.75 kPa. Se sabe que el módulo de elasticidad de los suelos disminuye al aumentar el contenido de NFU's [185]. Esta reducción del módulo puede llegar a ser hasta el 80% o incluso mayor dependiendo del contenido de NFU's [185]. Por lo tanto, se confirma al igual que en otras investigaciones [80], [179] que los granulados de NFU's requieren una precarga o presión de confinamiento, para evitar o minimizar las deflexiones que pudieran presentarse.

## 7.8. Propiedades hidráulicas

### 7.8.1. Permeabilidad

La permeabilidad,  $k$ , también conocida como conductividad hidráulica,  $K$ , es un parámetro que describe la resistencia del agua a fluir a través de un volumen de material granulado (p. ej. los NFU's) [80]. Y se define a partir de la siguiente formulación:

$$Q = k * i * A; \quad i = \frac{\Delta h}{l}; \quad k = \frac{Q * l}{A * \Delta h}$$

Donde  
 $Q$  = Caudal ( $m^3/s$ )  
 $k$  = Permeabilidad ( $m/s$ )  
 $i$  = Gradiente hidráulico (-)  
 $A$  = Superficie de la sección transversal ( $m^2$ )

*Ecuación 1. Condiciones Hidráulicas. Ensayo de permeabilidad. Fuente: [80].*

Se realizó un ensayo de permeabilidad de carga constante en permeámetro cilíndrico de pared rígida de acuerdo con lo que establece la norma UNE-EN ISO 17892-11:2019 [186]. El ensayo se inició saturando la muestra a través de un caudal impuesto en sentido ascendente en el total de la probeta, procedente de la conexión del equipo a la red de distribución de agua del laboratorio (ver ilustración 32). Se dejó circular agua por la muestra unos 5 minutos, con el fin de expulsar prácticamente la totalidad del aire ocluido.

La permeabilidad de los NFU's depende básicamente del tamaño, la densidad y la presión [80]. La mayoría de los estudios señalan que la permeabilidad de los fragmentos de NFU's es superior a los suelos convencionales, independientemente del tamaño y de la tensión de confinamiento.

La permeabilidad de los fragmentos de NFU's ( $\geq 300mm$ ) es como mínimo  $>10^{-2}$  m/s (1 cm/s) [80], [99], [153], incluso cuando se comprimen bajo el peso de un relleno [187]. El departamento de recursos naturales de Iowa, EUA (1990) [188], llevó a cabo investigaciones acerca de las propiedades hidráulicas de los NFU's como sustitutos de suelos de drenaje. Encontraron coeficientes medios de permeabilidad de entre 2.07-1.93 ( $10^{-2}$  m/s). Todos los valores estaban en el rango superior de los valores de permeabilidad requeridos para los materiales de subdrenaje.



*Ilustración 32. Ensayo de Permeabilidad y montaje de los granulados NFU's.*

Los resultados del ensayo se muestran en la tabla 29, con las combinaciones de los NFU's evaluadas para esta experimentación.

Tabla 29. Resultados de permeabilidad  $k$  (m/s) de las combinaciones de granulado de NFU's.

Muestra	Tiempo (s)	Volumen Q (ml)	Caudal (ml/s)	Caudal medio Q (ml/s)	Gradiente hidráulico $i$	Permeabilidad $k$ (m/s)
S <sub>4</sub>	9	100	11.11	9.89	3	6.85 (10 <sup>-4</sup> )
	20	200	10.00			
	29	300	10.34			
	41	400	9.76			
	52	500	9.62			
	60.3	600	9.95			
	72	700	9.72			
	84	800	9.52			
	95	900	9.47			
	106	1000	9.43			
	S <sub>5</sub>	11	100			
20		200	10.00			
30		300	10.00			
40		400	10.00			
51		500	9.80			
60.1		600	9.98			
71		700	9.86			
83		800	9.64			
95		900	9.47			
107		1000	9.35			
S <sub>6</sub>	7	100	14.29	14.41	3	10 (10 <sup>-4</sup> )
	14	200	14.29			
	21	300	14.29			
	27	400	14.81			
	35	500	14.29			
	42	600	14.29			
	49	700	14.29			
	56	800	14.29			
	60.2	900	14.95			
	70	1000	14.29			
S <sub>7</sub>	-	-	25.00	31.81	6	11(10 <sup>-4</sup> )
	8	200	25.00			
	9	300	33.33			
	12	400	33.33			
	15	500	33.33			
	18	600	33.33			
	21	700	33.33			
	23	800	34.78			
	27	900	33.33			
	30	1000	33.33			

Las astillas (10-50mm) tanto de grano fino como grueso, tienen permeabilidad entre 10<sup>-5</sup>-10<sup>-6</sup> m/s, valores típicos de las arenas. Los granulados ( $\leq 12$ mm) parecen tener una permeabilidad menor [173], y a medida que aumenta el tamaño de la partícula, la conductividad hidráulica aumenta de 2x10<sup>-3</sup> a 8.5x10<sup>-3</sup> m/s [143]. Cuando los granulados de NFU's se compactan tienen valores de permeabilidad equivalentes a los valores típicos

de los trozos (12-305 mm) de NFU's [171]. Estos resultados pueden relacionarse con la porosidad de las mezclas (que a su vez depende del tamaño de partícula) así como con la tensión vertical aplicada [170].

Analizando los resultados obtenidos en esta investigación, se observa que los valores de  $S_4$  (2,0 – 7,0) y  $S_5$  (90% 2,0 – 7,0 + 10% 0,6 – 2,0) son prácticamente iguales. Se estima que la mejora de distribución de la muestra  $S_6$  (50% 2,0 – 7,0 + 50% 0,6 – 2,0) y  $S_7$  (33% 2,0-7,0+ 33% 0,6-2,0 + 33% 0,0-0,8) mejora significativamente la permeabilidad, debido al acomodo de las partículas permitiendo un mejor drenaje. Se obtuvieron valores de coeficientes medios de permeabilidad entre de 6.85-11 ( $10^{-4}$  m/s).

De acuerdo con el CTE-DB SE-C: 2019 [189] las mezclas presentan resultados de coeficientes de permeabilidad característicos de suelos relacionados con las arenas limpias y mezcla de grava y arenas limpias ( $10^{-2}$  –  $10^{-5}$  m/s), suelos con drenaje adecuado para la implementación en obras de ingeniería. Varias investigaciones afirman [153], [181], [190], [191] que valores tan altos de permeabilidad hacen que el uso de granulados de NFU's, ya sea sólo o en combinación con suelos, sea una buena opción como material de relleno en terraplenes.

## **8. FASE EXPERIMENTAL DE PUESTA EN OBRA DEL MATERIAL**

En este capítulo se hace mención a los apartados referentes a las características necesarias para la implementación de granulados de NFU's en dos aplicaciones prácticas. Se muestra la fase inicial de la puesta en obra del material, sin llegar a entrar a detalle sobre las prescripciones específicas o el comportamiento del material en la fase de puesta en obra.

Los criterios de aceptación o rechazo en base a cálculos se encuentran en fase de desarrollo por parte de D<sup>a</sup> María Anguita García, dentro del proyecto de investigación "*Utilización de neumáticos triturados fuera de uso (NFU) en obras de geotecnia*". El proyecto consiste en fomentar la utilidad de mezclas de neumáticos triturados con arena y como rellenos todo-uno en distintas aplicaciones de geotecnia como actuaciones de rehabilitación, donde la estructura portante se beneficia del bajo peso específico de las partículas de NFU's. De esta forma, se cierra el ciclo de vida del material favoreciendo la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> al no emplear materiales de relleno convencional.

En esta siguiente fase de la experimentación se contempla la generación de modelos informáticos que permitan analizar los resultados obtenidos desde la caracterización del material. Se implementa el programa PLAXIS y los resultados se comparan con los cálculos obtenidos por el método manual. El software empleado considera los modelos de deformación plana y simetría axial. Además, permite usar diferentes modelos de comportamiento del suelo, como el elástico lineal Mohr-Coulomb (endurecimiento del suelo blanco) y los modelos de deslizamiento, como ya se realizó en otros estudios similares [192].

### 8.1. Criterios en aplicaciones a evaluar

De acuerdo con las investigaciones de Ali Tasalloti et al. (2021) [170] los criterios de diseño basados simplemente en la resistencia y la permeabilidad pueden no ser suficientes para la implementaciones de NFU's donde se requieran prestaciones altas, como en el caso de rellenos estructurales en cimentación. Es por ello que plantea un nuevo marco de criterios de diseño geotécnico adicionales, que incluye tres niveles de aceptación (ver ilustración 33):

- *Nivel 1:* Resistencia al corte por fricción / capacidad de carga. Cuando se utilizan como rellenos estructurales, los rellenos de NFU's deben tener un ángulo de fricción  $\phi' \geq 30^\circ$  y / o un CBR  $\geq 10\%$ . De lo contrario, solo deben recomendarse como rellenos generales.
- *Nivel 2:* Compresibilidad (nivel más crítico). Dado que la compresibilidad podría continuar durante un largo período de tiempo, se sugiere que los rellenos de NFU's se acepten como relleno estructural sólo si la deformación volumétrica ( $\epsilon_v$ )  $\leq 3\%$ . De lo contrario, solo deben recomendarse como rellenos generales.
- *Nivel 3:* Permeabilidad (no es un nivel crítico). Para garantizar la rápida disipación del exceso de presión de agua de poro (es decir, manteniendo un drenaje relativamente libre), se recomienda que los rellenos estructurales de NFU's tengan un coeficiente de permeabilidad similar al de los rellenos arenosos / grava (es decir,  $1 \times 10^{-8} \text{ m/s} \leq k \leq 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ). De lo contrario, solo deben recomendarse como rellenos generales.

Dichos criterios se han tenido en cuenta para su posible aceptación en relación a la fase experimental y de las posibles aplicaciones que se especifican para las fases evaluadas en esta investigación.



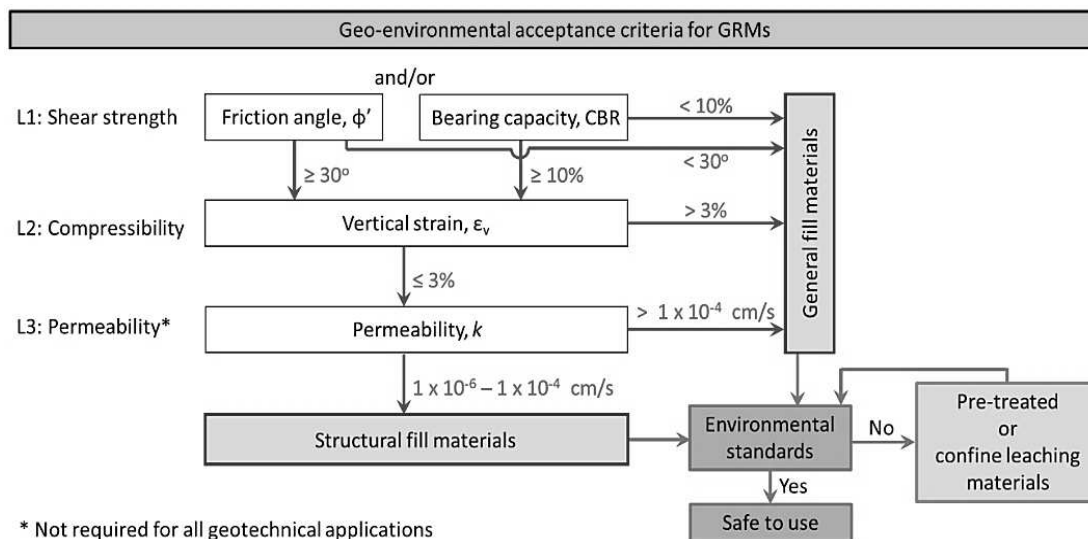


Ilustración 33. Criterios de aceptación de muestras de NFU's en aplicaciones geotécnicas. Fuente: [170]

En principio se observa que en relación a los criterios de aceptación:

- Para el primer nivel ( $\phi' \geq 30^\circ$ ), las muestras  $S_3$  y  $S_5$  mostraron valores superiores a  $30^\circ$  en solo una de las siete pruebas realizadas. El resto de las muestras no logra cumplir dicha especificación, quedando como media resultados de  $22$  y  $23^\circ$  respectivamente;
- En el segundo nivel de compresibilidad (nivel más crítico), en los resultados de las pruebas de edometría se presenta deformación volumétrica ( $\epsilon_v$ )  $\leq 3\%$ , cuando las muestras se someten a presiones inferiores a  $10 \text{ kPa}$ , segundo escalón de carga (presiones de confinamiento bajas). Es decir, que se observan deformaciones altas comparadas con las que se suelen obtener en los estudios de compresibilidad del suelo convencional;
- Para el tercer nivel, las probetas NFU's presentan coeficientes de permeabilidad entre de  $6.85\text{-}11 (10^{-4} \text{ m/s})$ , valores que se encuentran dentro de los rangos establecidos para arenas limpias y mezcla de grava y arenas limpias ( $10^{-2} - 10^{-5} \text{ m/s}$ ), suelos con drenaje adecuado para la implementación en obras de ingeniería.

Desde un punto de vista general, el conjunto de las muestras evaluadas no superan las especificaciones para altas prestaciones. Se decidió estudiar casos prácticos donde las prestaciones sean moderadas y las características propias del material puedan ser de utilidad para su implementación.

## 8.2. *Granulado de NFU's en capas de rellenos en viarios*

Cuando las obras de ingeniería se construyen en suelos débiles y comprimibles, las consideraciones de estabilidad y asentamiento son críticas. Se deben utilizar materiales ligeros en la construcción de rellenos para reducir el peso de las estructuras civiles sobre estos suelos. Los granulados de NFU's poseen propiedades técnicas atractivas y podrían ser utilizados de forma beneficiosa en aplicaciones de ingeniería civil.

Se cuenta con casos prácticos como ejemplos de buenas prácticas de la implementación de NFU's en terraplenes. La obra de acceso al aeropuerto de Portland y a Congress Street (1998) consistía en una estructura que se encontraba sobre un estrato de 12 metros de arcilla marina débil. En este caso los diseñadores del proyecto (las oficinas en Maine de HNTB, Inc. y Haley and Aldrich, Inc. y la Universidad de Maine) descubrieron que los terraplenes construidos con suelo convencional eran demasiado pesados, lo que suponía un factor de seguridad inaceptable para la estabilidad de los taludes. Se optó por los fragmentos de NFU's porque eran 300.000 dólares más baratos que las demás alternativas estudiadas [129]. En este caso, el proyecto dio un uso final beneficioso de 1.2 millones unidades de neumáticos. Se tomaron varias medidas para cumplir las directrices que limitan el calentamiento de los rellenos de NFU's [96], [108]. Las capas se limitaron a espesores mayores a 3 m divididas por capas de 1 m de suelo convencional (Ver ilustración 34). En el exterior y en la parte superior del relleno se colocó tierra de baja permeabilidad con un mínimo de 30% de finos (que pasan el tamiz nº 200) para limitar la entrada de aire y agua. Por último, se especificó la implementación de fragmentos con un mínimo de finos, menos del 25% que pasaba el tamiz de 1½ pulgadas (40mm) y menos del 1% que pasaban el nº 4 (5mm) [129].

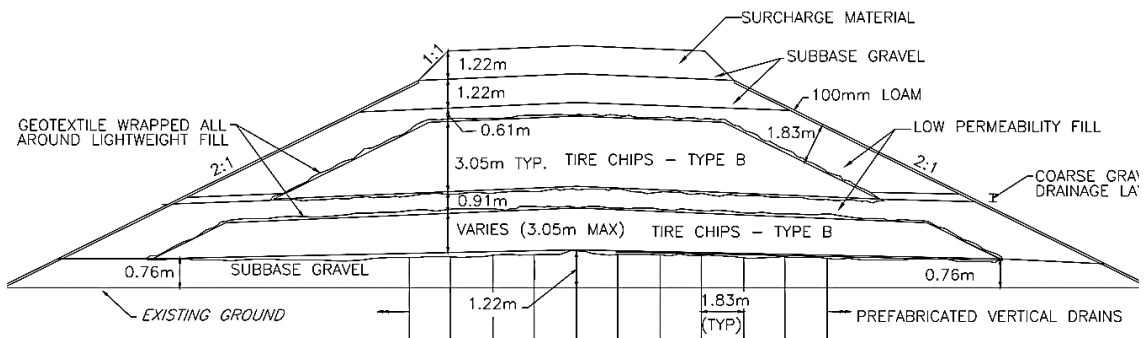


Ilustración 34. Sección transversal de un terraplén construido sobre arcilla marina blanda para el intercambiador del puerto de Portland. Fuente: [187]

En la mayoría de los casos, los materiales ligeros de relleno se utilizan para reducir la carga de diseño de los rellenos, mejorando así la estabilidad de los taludes y reduciendo la presión lateral de la tierra sobre la estructura [102]. En este sentido, la presente investigación pretende exponer la implementación de partículas inferiores a 12 mm en capas de viarios con el objetivo de reducir el peso del mismo y así aminorar las cargas transmitidas al terreno.

El Laboratorio de Geotecnia del CEDEX ha participado en diversos proyectos que abordan la implementación de NFU's en viales, redactando a partir de ellos la "Guía para el proyecto y ejecución de rellenos viarios con NFU troceados" para la Delegación General de Carreteras (DGC). Entre sus muchas conclusiones, CEDEX afirma que la construcción de relleno viario con NFU's es perfectamente viable desde un punto de vista técnico y ambiental, siempre que se cumplan con las especificaciones de proyecto de ejecución [106]. En la siguiente tabla 30 se enlistan experiencias llevadas a cabo en terraplenes.

*Tabla 30. Experiencia de materiales reciclados en terraplenes.*

<b>MATERIAL FUENTE</b>	<b>EXPERIENCIA</b>	<b>APLICACIÓN</b>	<b>RESULTADOS</b>
NFU's Fuente: [99, p. 102] (Botello Rojas et al., 2008).	Duplicación de la carretera M-111 y Variante Fuente el Saz, Madrid.	Relleno seleccionado para terraplén.	Los NFU's como relleno en terraplenes no producen ningún impacto medioambiental en la calidad de las aguas subterráneas. La presión vertical producida en el cimientado del relleno debido a la presencia de NFU's, es de aproximadamente un 70% menor que la correspondiente obtenida en un terraplén convencional. Los asentamientos esperados ocurren durante el proceso constructivo a un tiempo limitado a dos o tres meses, y posteriormente no se esperan grandes deformaciones.
NFU's Fuente: [97, p. 105] (Parra Arraya, 2012).	Autopista AP-46. Alto de las Pedrizas-Málaga.	Ejecución del terraplén, dos secciones tipo.	El Tramo de 100 m de longitud, con 3 secciones tipo: - Sección de control - Sección mezcla NFU's-suelo - Sección NFU's. En total se consumieron 3.000 toneladas de triturado de NFU's como relleno de ligero del terraplén.
NFU's Fuente: [97, p. 108] (Cano Linares et al., 2010).	Bandas de ensayo (DGC y el CEDEX)	Cuatro bandas de ensayo. Compactación: rodillo liso y bulldózer.	Las deformaciones verticales máximas sufridas por las tongadas de la banda de NFU's-suelo marginal estuvieron comprendidas entre 18% y 24%, inferiores al valor medio obtenido en la banda de NFU's compactada con rodillo (30%). Las densidades obtenidas han resultado ser: - NFU's, compactado con rodillo: 0.84 y 0.91 t/m <sup>3</sup> - NFU's, compactado con bulldózer: 0.72 y 0.91 t/m <sup>3</sup> - Mezcla NFU-suelo marginal compactado con rodillo: 1.5 y 1.9 t/m <sup>3</sup> .
NFU's Fuente: [193] (2017).	Bandas de prueba, tramo Autovía Linares – Albacete (A-32).	Ejecución de secciones en terraplén: NFU's y mezclas NFU's-suelo.	La maquinaria más adecuada para realizar la compactación de tiras de NFU's no mezclados y de mezclas con suelos es el rodillo liso vibratorio. No se ha podido determinar con absoluta claridad el número mínimo de pasadas de compactador necesarios para la compactación. El relleno con NFU's compactado presenta una densidad muy ligera que puede ser ventajosa para determinadas aplicaciones. La mezcla de NFU's-suelo produce un material más denso, menos deformable y más fácilmente compactable.
RCD's Fuente: [97, p. 126] (Matachana et al., 2004) (Bocchino, 2010)	Viales 4104 y 4099, Guadabajaque (CEDEX y la Universidad de León)	Aplicación de los criterios del PG-3 en terraplenes.	El comportamiento de los terraplenes ha sido totalmente satisfactorio e incluso se ha empleado el mismo material para la construcción de la ampliación de dichos viales de acceso. Se llega a la conclusión de que se trata de un material clasificado como adecuado.
MATERIALES LIGEROS, ARLITA. Fuente: [97, p. 133] (Weber, 2006)	Urbanización plaza de la estación, Zaragoza.	La nueva estructura debía soportar un relleno que no le transmitiera demasiada carga al elemento.	Gracias a la solución empleada se consiguió reducir la carga un 75% lo cual permitió no tener que demoler toda la estructura. Debido a su facilidad de puesta en obra se consiguen rendimientos elevados en los procesos constructivos.

En general, se destaca la reducción de cargas que se transmiten en la cimentación y a los elementos aledaños con la implementación de materiales reciclados ligeros en terraplenes. En la actualidad en España, para emplear un material no convencional en un terraplén es necesario que el residuo preste condiciones similares a las especificaciones técnicas de los materiales convencionales [99]. Una de las principales preocupaciones del uso de NFU's en los terraplenes son los grandes asentamientos (alrededor del 10 al 15%) observados en varios estudios de campo y de laboratorio [171]. Hay poca información disponible sobre los asentamientos tolerables de los terraplenes de las carreteras. Los asentamientos posteriores a la construcción de 0.3 a 0.6 m (1 a 2 pies) durante la vida

útil de un terraplén pueden considerarse tolerables siempre que sean razonablemente uniformes a lo largo del tramo en cuestión. Los efectos perjudiciales de los asentamientos en este rango se pueden reducir utilizando pavimento flexible sobre los rellenos de NFU's [108].

Si se emplean los NFU's como relleno de terraplenes, se hace necesario la implementación de una capa de suelo convencional entre el residuo y el paquete de firmes, por tres motivos [91]:

- Limitar los asientos del paquete de firmes, producidos por las cargas del tráfico.
- Prevenir el contacto que pueda existir entre los vehículos y el troceado, que puede tener cables de acero expuestos.
- Reducir la posibilidad de incendio.

Los problemas potenciales asociados al uso de NFU's en los terraplenes de las carreteras son:

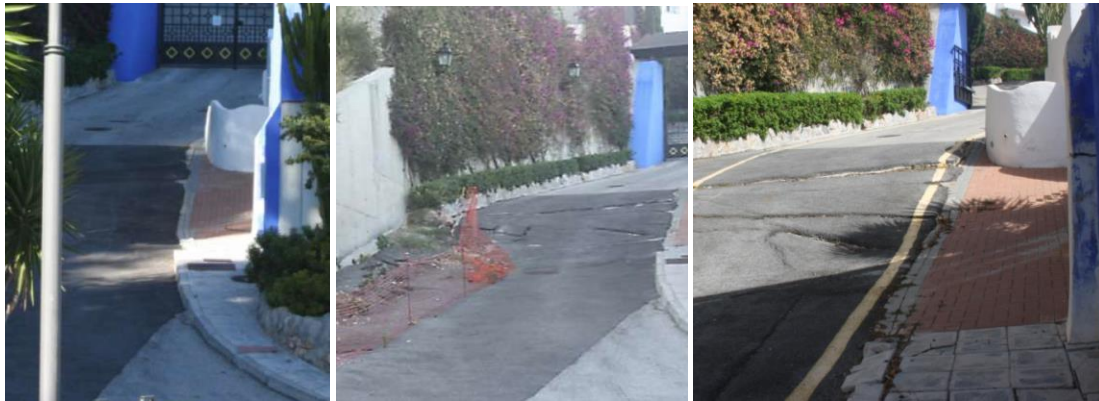
- La lixiviación de metales e hidrocarburos.
- El riesgo de incendio.
- La gran compresibilidad de los NFU's.

De forma general, se puede afirmar que el coste de utilizar NFU's en los terraplenes depende de una serie de factores que varían en función de las condiciones locales:

- El coste ocasionado por el proceso de trituración del NFU's, gestiones internas de las propias plantas de tratamiento.
- El coste del transporte del granulado de NFU's, que a su vez depende de la distancia de las instalaciones de trituración al lugar de la obra.
- El coste de la colocación y la compactación, que a su vez estará acompañado de las posibles prescripciones técnicas específicas para la puesta en obra de los NFU's.

### 8.2.1. Propuesta de actuación

Aunque no se trate de una experiencia llevada a cabo en el relleno de un terraplén, se plantea el estudio de una capa reductora de peso y de cargas transmitidas a terrenos débiles. Como caso práctico, por la vinculación del tutor de esta tesis D. Antonio Jaramillo Morilla, catedrático de Ingeniería del Terreno, de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla, se propuso intervenir en la rehabilitación de uno de los viales de acceso a la Urbanización Cármenes del Mar, en Almuñécar (Granada). A continuación se presenta la evolución de los daños y desplazamientos presentados en el vial:



*Ilustración 35. Evolución de los daños y asentamientos en vial de acceso de la Urbanización Cármenes del Mar, Almuñécar. Noviembre 2012-Noviembre 2014-Marzo 2019. Fuente: Antonio Jaramillo Morilla.*

En este caso, se hace necesario el empleo de materiales ligeros que reduzcan las cargas transmitidas al suelo. Esta urbanización fue construida sobre una ladera inestable para la que se necesitó la ejecución de terrazas como soporte, con más de veinte metros de relleno en algunas zonas y cuyos asientos han superado los desplazamientos admisibles (ver ilustración 36 y 37). Los granulados de NFU's tienen un peso del orden de un tercio inferior respecto al material convencional [129], lo que ayuda a la estabilización de la zona mediante el uso de un residuo industrial reciclado como material de construcción.



*Ilustración 36. Daños y asentamientos en vial de acceso de la Urbanización Cármenes del Mar, Almuñécar, Zona de actuación.*



*Ilustración 37. Asentamientos puntuales en vial de acceso de la Urbanización Cármes del Mar, Almuñécar. Zona de actuación.*



### 8.2.2. Características intrínsecas del material

Se toma como condición de partida el relleno de NFU's en la zona de coronación del terraplén, de acuerdo con las especificaciones descritas en el PG-3. Se hace la mención de que cuanto más pequeña es la partícula, más limitado se encuentra el espesor de capa que se puede colocar de dicho material. En este estudio se propone utilizar triturados de NFU's de partículas no esféricas con tamaños que van desde 0,6 mm a 7,0 mm, pedazos de NFU's sin acero y con porcentajes inferiores al 5% de textiles incrustados en la partícula (despreciables para la caracterización). La granulometría contemplada para esta puesta en marcha ha sido la S<sub>5</sub> (90% 2,0 – 7,0 + 10% 0,6 – 2,0) (Ver ilustración 38). En total se propone el empleo de 6 toneladas de material. A continuación se describen las características contempladas en la implementación del material:

*Tabla 31. Características intrínsecas del granulado de NFU's, material propuesto en la reparación del vial de acceso de la Urbanización Cármenes del Mar, Almuñécar.*

<b>Muestra</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>P<sub>a</sub> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>W<sub>A24</sub> (%)</b>	<b>ρ<sub>d</sub> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>C (kPa)</b>	<b>φ (°)</b>	<b>Características generales</b>
S <sub>5</sub>	90% 2,0 – 7,0 +10% 0,6 – 2,0	1.10	8.30	5.93	9.72	23.24	ausencia de plasticidad y nula materia orgánica



*Ilustración 38. Granulometría S<sub>5</sub> (90% S<sub>4</sub> 2,0 – 7,0 + 10% S<sub>2</sub> 0,6 – 2,0 mm), material propuesto para la reparación del vial de acceso de la Urbanización Cármenes del Mar, Almuñécar.*

### 8.1.3. Prescripciones técnicas

De acuerdo con el PG-3 [194] para la implementación de materiales reciclados se deberán contemplar una serie de aspectos relacionados con las propiedades intrínsecas del material, así como la influencia de dichas características en la implementación como

capa de terraplén (o capa de vial), además de una justificada validación del uso, con las correspondientes prescripciones técnicas a adoptar en las diferentes etapas del proceso constructivo.

Se propone actuar en la zona de coronación del terraplén (o vial), sobre el que apoyará el firme, reemplazando una capa de 40 cm de granulado de NFU's entre la capa de terreno natural y el firme del vial de acceso a la urbanización.

En principio se realizó la elección de una zona adecuada de acopio, que permitió extender el material y tenerlo seco. Se tomaron las precauciones convenientes para el acopio durante la obra, para la prevención de los riesgos de incendio y de los riesgos derivados de un exceso de almacenamiento (Ver ilustración 39).



*Ilustración 39. Acopio del granulado de NFU's en urbanización Cármenes del Mar como sistema de aligeramiento de peso en zonas con asentamientos.*

Se propone la implementación de una capa de 40 cm de espesor sobre el terreno natural, restringiendo el acceso del relleno al aire y al agua, de acuerdo con lo que establece la norma ASTM D 6270 [84], con una compactación a través de un rodillo liso vibratorio (mínimo 10 pasadas). Se sabe que las deformaciones más considerables se producen en la fase inicial de asientos, de ahí la importancia de la compactación inicial del NFU's para evitar la aparición de estas patologías durante su vida útil.

Siguiendo con las recomendaciones marcadas por el catálogo de residuos utilizables en construcción de CEDEX [106], a continuación se resumen las prescripciones técnicas en forma de procesos constructivos:

- Levantamiento de la zona afectada, tanto de la capa de asfalto como de la capa de terreno. El espesor aproximado de excavación es de 50 cm (10 cm de asfalto + 40 cm de terreno). Compactación del terreno natural, 90-95% Próctor. Excavación en forma de cajón que evite las deformaciones laterales excesivas durante la compactación.
- Colocación de geotextil permeable y resistente al punzonamiento, sobre la capa térrea excavada y compactada.
- Mezcla de las granulometrías que conforman el conjunto. En el caso de usarse diferentes tamices, se cuenta con la ayuda de un cazo de retroexcavadora antes de su puesta en obra, hasta conseguir una correcta homogeneidad.
- Vertido del material de relleno. El granulado de NFU's se extiende en dos tongadas de 25 cm aproximadamente. Cada capa se compacta hasta tener un espesor aproximado de 20 cm con rodillo liso vibratorio, 10 pasadas como mínimo hasta conseguir el grado de compactación, 90-95% Próctor.
- Se aplica una humedad del 15-20% del peso del material, lo que equivale a un 10% aproximadamente en volumen para la compactación.
- Colocación de geotextil para separar el material del hormigón.
- Solera de hormigón armado de 10 cm de espesor, realizada con hormigón HA-25/B/20/IIa fabricado en central, y vertido con bomba.

De acuerdo a la *"Guía para el proyecto y ejecución de rellenos viarios con NFU troceados"* para la DG de carreteras del Ministerio de Fomento [99], se confirma la importancia de tomar en cuenta las siguientes prescripciones técnicas para la puesta en obra:

- Las capas de NFU's deben colocarse por encima del máximo nivel freático esperable y de la cota de inundación prevista en la zona de implantación.
- Cuando sea posible, la cara inferior de las capas de NFU's debe estar situada, al menos, a 1 m por encima de la cota superior del terreno natural. Al igual que la

cara superior de la capa de NFU's de mayor cota debe estar, como mínimo, a 1 m de la cara superior de la coronación del terraplén.

- El espesor de las capas de NFU's no debe ser mayor de 3 m.
- Las capas de NFU's han de envolverse en geotextiles para evitar la percolación de partículas de suelo entre los trozos de NFU's.
- Los espaldones del relleno deben asegurar la impermeabilidad ante el agua o aire, y tener anchura suficiente para su adecuada compactación.

De acuerdo con el PG-3 [124], art. 330.6.2 *Extensión de las tongadas*, el extendido del material se realizará en forma de tongadas de manera uniforme y, si no lo fueran, se conseguirá esta uniformidad mezclándolos convenientemente con maquinaria adecuada para ello. Deben tenerse las correspondientes precauciones para que no se coloque una tongada mientras no se haya comprobado que la superficie subyacente cumple las condiciones exigidas. A continuación se ilustran las fases del proceso constructivo, a partir de las imágenes tomadas en obra:



Ilustración 40. Puesta en obra del Granulado de NFU's en Urbanización Cármenes del Mar como sistema de aligeramiento de peso en zonas con asentamientos.

Como se ha mencionado con anterioridad, la presente investigación solo contempla el estudio de las características del granulado de NFU's. La siguiente fase del estudio de puesta en marcha se encuentra en fase de desarrollo por D<sup>a</sup> María Anguita García, en el proyecto de investigación "Utilización de neumáticos triturados fuera de uso (NFU) en obras de geotecnia". Los cálculos y las comprobaciones pertinentes se encuentran desarrollándose para confirmar la viabilidad técnica de dicha implementación. La presente investigación se encarga de poner de manifiesto parte del proceso constructivo y las especificaciones técnicas relacionadas con las propiedades intrínsecas del material utilizado.

### 8.3. Granulado de NFU's en rellenos de trasdós de muros de contención

El uso de un material más ligero como relleno de trasdós para muros de contención se presenta como la segunda aplicación potencial que presentan los granulados de NFU's, ya que debido a su elevada deformabilidad son capaces de absorber el esfuerzo de compactación del relleno sin generar grandes empujes sobre el muro (del orden de los 2/3 de los empujes que se consideran habitualmente [99]). Induce una presión lateral de tierra menor y mejora el drenaje, lo que permite la construcción de estructuras de contención más delgadas reduciendo de forma importante el coste final de la obra. Además, hay que tener en cuenta que los NFU's no son biodegradables y, por tanto, son más duraderos [155], [195].

En relación con los costes del granulado de NFU's como material ligero, las investigaciones de Sungmin Yoon et al. (2006) [195] afirman que el coste de los pedazos de NFU's depende del tamaño de la partícula, variando de 4 a 44 € por m<sup>3</sup> (aproximadamente 0.45 toneladas). Afirman también que los NFU's son relativamente económicos en comparación con el coste de otros materiales de relleno livianos habitualmente utilizados (Ver tabla 32).

*Tabla 32. Peso unitario y costo de varios materiales de relleno livianos. fuente:[195]*

<b>Material ligero</b>	<b>Peso unitario (kN /m<sup>3</sup>)</b>	<b>Costo aproximado (€/m<sup>3</sup>)</b>
NFU's	5.5-6.4	18-27
Poliestireno expandido (EPS)	0.2-1	31-58
Fibra de madera / aserrín	8-10	11-18
Arcilla expandida	3-10	36-49
Ceniza voladora	10-14	13-19

En cuanto al coste, Leticia Sainz, directora de desarrollo e innovación de SIGNUS, precisa que «el coste es muy similar al de la grava. En el castillo de Utrera ha resultado un poco más alto porque se ha utilizado granulado de dos a siete milímetros, sin telas ni elementos metálicos, porque se quieren evitar problemas de óxido». Desde su departamento se trabaja en una búsqueda constante de nuevas aplicaciones, además de la mejora de las ya consolidadas. «El potencial del neumático reciclado es enorme y su aplicación en ingeniería civil muy interesante. Ahora solo falta la implicación de un sector que es bastante conservador, a pesar de que cada día hay más empresas concienciadas e implicadas en la protección del medio ambiente y el reciclaje»[196].

#### 8.3.1. Propuesta de actuación

Se plantea la siguiente actuación, de acuerdo con el proyecto "3ª ETAPA DE EJECUCIÓN CONSERVACIÓN MURALLA DEL CASTILLO LIENZO ENTRE TORRE OESTE Y SUROESTE". Las labores de restauración corren a cargo de D. Antonio Jaramillo Morilla, catedrático de Ingeniería del Terreno, de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla y la constructora DER PROYECTOS Y OBRAS, SL. La obra consiste en la recuperación del perfil original de la estructura del Castillo de Utrera, ya que la fábrica ha sufrido deterioro a raíz de la erosión ocasionada por las condiciones climatológicas (Ver ilustración 41).



*Ilustración 41. Zona de actuación, rehabilitación del castillo de Utrera, Sevilla.*

Se propone la construcción de un muro de contención con tres contrafuertes en la parte exterior del lienzo suroeste, acompañado de un forjado unidireccional apoyado sobre una citara de LHD que envuelve el muro original, dejando vestigios de éste mediante ventanas en la citara [197]. En la ilustración 42 se presenta la zona de actuación dentro del Castillo de Utrera.

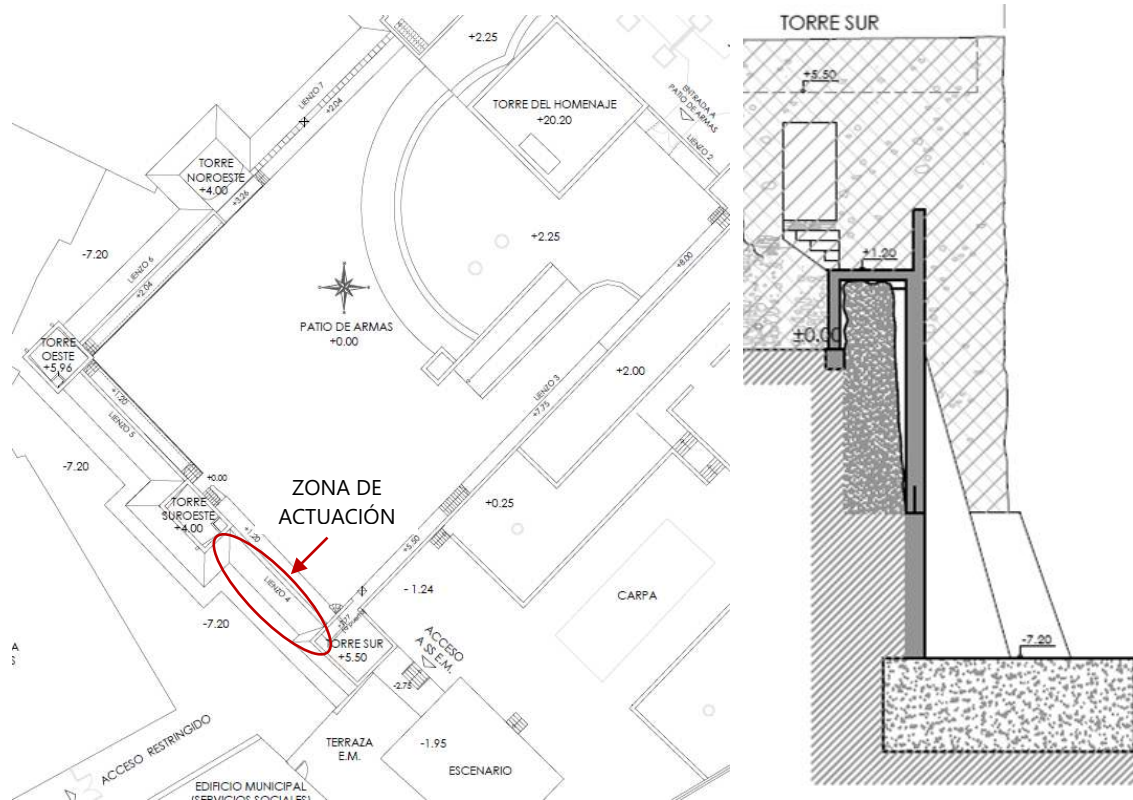


Ilustración 42. Planta y alzado, obras de rehabilitación del Castillo de Utrera, Sevilla. Fuente: [197].

Se propone realizar una obra de rehabilitación completando la parte superior del lienzo del muro del castillo con una estructura de hormigón, y rellenar los huecos entre los restos del lienzo y el nuevo paramento con granulados de NFU's. Se propone alternar capas de arena y de gránulos de caucho. El material se colocó en Big Bags (V: altura 2m x base 1m) (ver ilustración 43). Las granulometrías del granulados de caucho propuestas para el relleno fueron; S<sub>4</sub> (6.300 Kg-5 big bags); S<sub>3</sub> (1.200 Kg-1 big bag); S<sub>2</sub> (2.000 Kg-2 big bags).



Ilustración 43. Acopio de Granulado de NFU's. (Izquierda planta de tratamiento, derecha obras de actuación Muro castillo de Utrera).



### 8.3.2. Características intrínsecas del material

Los NFU's poseen cualidades y propiedades tales como buen comportamiento de fricción, bajo peso unitario de sólidos, baja densidad aparente, alta permeabilidad y alta deformabilidad elástica [134]. Los rellenos de estructuras de contención tienen que realizarse con un material muy drenante. Uno de los requisitos más importantes para usar los NFU's troceados como material de relleno es evaluar su permeabilidad. En las propiedades hidráulicas de los NFU's evaluadas en esta investigación, se encontraron coeficientes medios de permeabilidad entre de  $6.85-11 \times 10^{-4}$  m/s. De acuerdo con el CTE-DB SE-C: 2019 [189] las mezclas presentan resultados de coeficientes de permeabilidad característicos de suelos con drenaje adecuado para la implementación en obras de ingeniería.

Con base en investigaciones iniciales [81], [91], [105], se encontró que el peso específico a granel (muestras >12mm) puede llegar a medir 5.3 y 6.0 kN/m<sup>3</sup>, que es casi cinco veces menor que la arena [101]. Teniendo en cuenta los hallazgos anteriores, se puede ver que es posible una reducción en el peso (de hasta un 66%) cuando se adopta el granulado de NFU's como un reemplazo total o parcial en el diseño de la subestructura [173]. Un beneficio adicional de reducir el peso de las mezclas de suelo con el material de relleno, es que podría resultar en una reducción del asentamiento debido a la menor presión de sobrecarga.

A continuación se describen las características contempladas en la implementación del material:

*Tabla 33. Características intrínsecas del granulado de NFU's, propuesto en las obras de rehabilitación del castillo de Utrera, Sevilla.*

<b>Muestra</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b><math>\rho_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>C (kPa)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b>Permeabilidad k (m/s)</b>	<b>Coefficientes de compresibilidad (C<sub>c</sub>)</b>	<b>Coefficientes de hinchamiento (C<sub>s</sub>)</b>
S <sub>4</sub>	2.0 – 7.0	5.30	18	22			
S <sub>3</sub>	2.0 – 4.0	5.80	15	22	6.85 x 10 <sup>-4</sup>	0.44-0.26	0.47-0.15
S <sub>2</sub>	0.6 – 2.0	5.60	13	23			

### Composición granulométrica del material filtrante.

De acuerdo con el PG-3 en la parte 4<sup>ta</sup> [125] relacionada con la composición granulométrica del material filtrante, se observan las siguientes especificaciones:

- El tamaño máximo no será, en ningún caso, superior a setenta y seis milímetros (76 mm), y el cernido ponderal acumulado por el tamiz 0,080 UNE no rebasará el cinco por ciento (5%).
- Si el terreno natural está constituido por suelos no cohesivos con arena fina y limo, el material drenante deberá cumplir, además de las condiciones de filtro generales, la siguiente:  $F_{15} < 1 \text{ mm}$ .
- El coeficiente de uniformidad del filtro será inferior a veinte ( $F_{60}/F_{10} < 20$ ).
- En relación a la composición granulométrica, siendo  $F_x$  el tamaño superior al del  $x \%$ , en peso, del material filtrante, y  $d_x$  el tamaño superior al del  $x\%$ , en peso, del terreno a drenar, se deberán cumplir las siguientes condiciones de filtro:

$$(a) \frac{F_{15}}{d_{85}} < 5 ; (b) \frac{F_{15}}{d_{15}} > 5 ; (c) \frac{F_{50}}{d_{50}} < 25$$

*Ecuación 2 Composición granulométrica de material filtrante, PG-3 parte 4, Drenajes. Fuente : [125]*

Para el caso de estudio:

- **$F_{15}$ ;  $F_{50}$**  Datos de las diferentes combinaciones propuestas como material filtrante, granulados de NFU's (Ver tabla 34).

*Tabla 34. Propuesta de material filtrante, muestras de granulado de NFU's.*

MATERIAL FILTRANTE	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>
Tamaño (mm)	0.0-0.8	0.6-2.0	2.0-4.0	2.0-7.0	90% 2.0-7.0 + 10% 0.6-2.0	50% 2.0-7.0 + 50% 0.6-2.0	33% 2.0-7.0+ 33% 0.6-2.0+ 33% 0.0-0.8
$F_{15}$ *	0.22	1.10	2.20	1.80	2.20	1.20	0.49
$F_{50}$	0.51	1.50	2.90	4.90	4.40	2.20	1.50
$C_u < 20$	3.33	1.45	1.50	2.08	2.50	2.73	4.74

*\*Para suelos no cohesivos con arena fina y limo  $F_{15} < 1 \text{ mm}$*

- **$d_{85}$ ;  $d_{15}$ ;  $d_{50}$**  Se realizó una base de datos de las curvas granulométricas de algunos tipos de suelos (Ver tabla 35), a través de los estudios geotécnicos que se enlistan a continuación:

1. Vivienda en calle Nufro Sánchez Sevilla. Ingeosur [198].
2. Edificio dependencias Parcela 101, Chiclana de la Frontera (Cádiz), Ingeosur [199].
3. Vivienda unifamiliar en Santi Ponce (Sevilla). Ingeosur [200].
4. Rehabilitación de edificio en calle Velázquez Sevilla. Geotema [201].
5. Rehabilitación de edificio en calle Velázquez Sevilla. Geotema [201].
6. Vivienda en calle Marqués Luca de Tena Sevilla. Labson [202].
7. Edificio de viviendas y garaje en calle Juan Rabadán y Castillo Sevilla. Labson [203].
8. Rehabilitación del Mercado "Puerta de la Carne" Sevilla. Vorsevi [204].
9. Edificio de 15 viviendas y garajes en Carretera de Carmona Sevilla. [205].

Tabla 35. Propuesta de material de relleno, de los estudios geotécnicos de referencia.

TERRENO A DRENAR	1 [198]	2 [199]	3 [200]	4 [201]	5 [201]	6 [202]	7 [203]	8 [204]	9 [205]
CLASIFICACION SUCS [156]	Gravas limo arcillosas con arenas (GC-GM)	Arcillas de alta plasticidad (CH)	Limos arenosos (ML)	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad (CL)	Gravas limosas (GM)	Arenas Arcillosas (SC)	Arenas limosas (SM)	Gravas arcillosas (GC)	Gravas arenosas con indicios de limos (GW)
$d_{15}$	0.05	0.05	0.05	0.02	0.08	0.03	0.06	0.02	0.70
$d_{50}$	0.40	0.40	0.40	0.05	3.30	0.55	0.67	0.14	10.00
$d_{85}$	7.00	7.00	7.00	0.38	11.00	10.40	7.00	10.90	24.00

Evaluando como condición de partida que el material filtrante son las diferentes muestras de granulado de NFU's de esta investigación ( $F_{15}$ ;  $F_{50}$ ) y que el terreno a drenar son las diferentes granulometrías contempladas en los estudios geotécnicos antes mencionados ( $d_{15}$ ;  $d_{50}$ ;  $d_{85}$ ), se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 36. Resultados del análisis de material filtrante de las muestras de granulado de NFU's ( $F_{15}$ ;  $F_{50}$ ) y diferentes tipos de suelos de acuerdo con las condiciones de composición granulométrica del PG-3.

RELACIÓN COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>
(a) $\frac{F_{15}}{d_{85}} < 5$ ; (b) $\frac{F_{15}}{d_{15}} > 5$ ; (c) $\frac{F_{50}}{d_{50}} < 25$							
Arenas Arcillosas (SC)	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Arenas limosas (SM)	NO	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	NO
Gravas limosas (GM)	NO	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Gravas arcillosas (GC)	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	NO	NO	CUMPLE	CUMPLE
Gravas limo arcillosas con arenas (GC-GM)	NO	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	NO
Arcillas de alta plasticidad (CH)	CUMPLE	CUMPLE	NO	NO	NO	NO	CUMPLE
Limos arenoso (ML)	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad (CL)	CUMPLE	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Gravas arenosas con limos (GW)	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Se observa que el conjunto de las muestras satisface los requisitos de un buen material filtrante, permitiendo el flujo adecuado del agua hacia la tubería de drenaje cuando se trate de un relleno de arenas arcillosas (SC). A juzgar por los resultados, las muestras S<sub>2</sub> hasta la S<sub>6</sub> se podrían utilizar en rellenos tipo; Arenas limosas (SM), gravas limosas (GM),

gravas limo arcillosas con arenas (GC-GM). La muestra S<sub>1</sub> se contempla como una buena opción para rellenos con arcillas (CL; CH), debido a la buena relación granulométrica que mantiene el material filtrante con el relleno. Para otro tipo de material de relleno es recomendable realizar un análisis a detalle para su correcto funcionamiento, que permita un drenaje adecuado.

### 8.3.3. Prescripciones técnicas

Se propone una nueva revalorización del granulado de NFU's, en una aplicación que permite un mayor impacto por metro cúbico utilizado. La implementación de residuos industriales apuesta por la economía circular y evita la huella de carbono que genera la extracción de materiales pétreos. En total, se propone la sustitución de 9.500 kg (16m<sup>3</sup>) de granulado de NFU's, lo que supone suprimir la extracción de un material convencional, así como reutilizar un residuo industrial.

Siguiendo con lo establecido en el PG-3 para la implementación de materiales marginales, el granulado de NFU's deberá contemplar las correspondientes prescripciones técnicas a adoptar en las diferentes etapas del proceso constructivo.

Se propone seguir las siguientes directrices en el proceso constructivo:

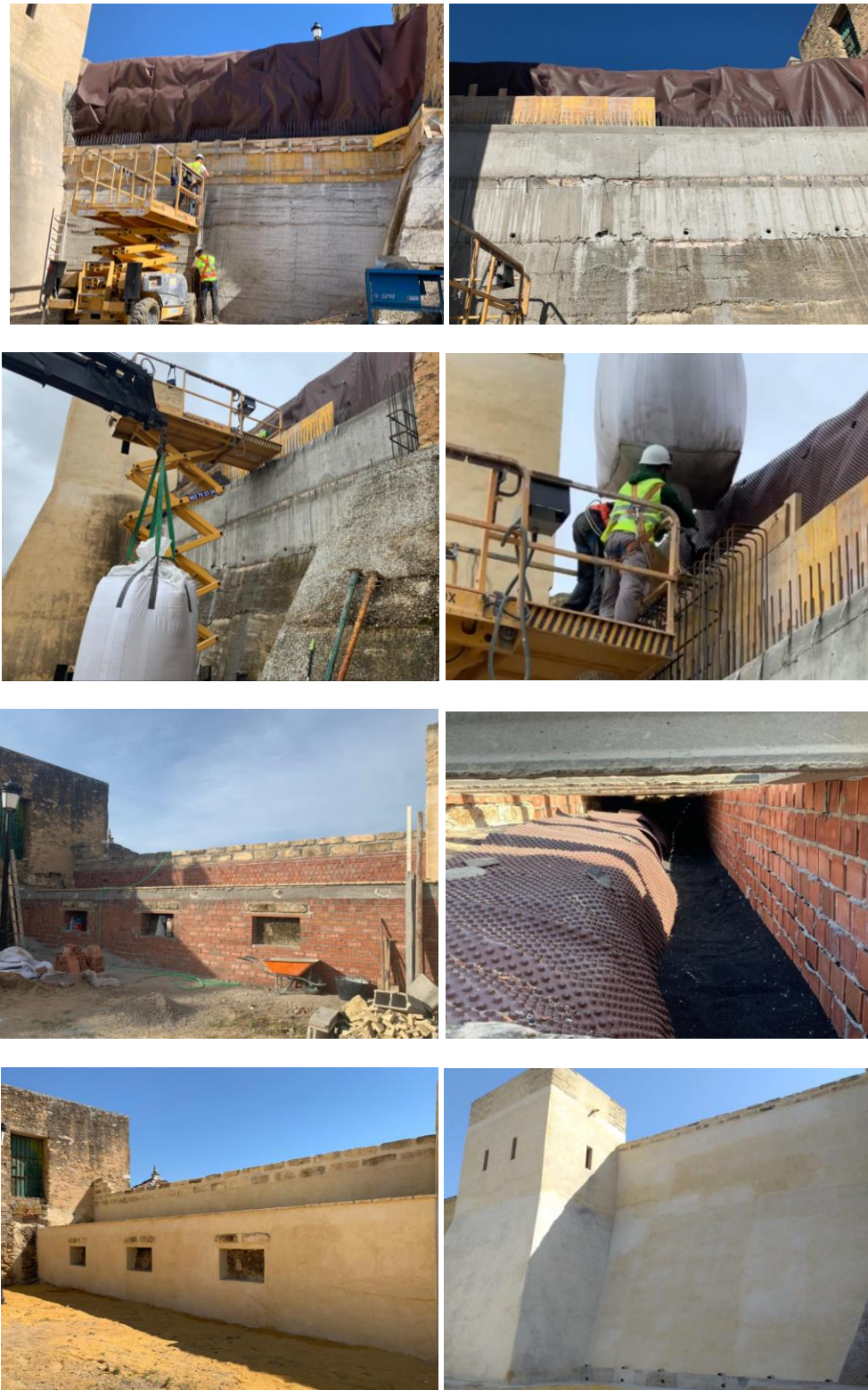
- Como actividades previas se prevé la limpieza del paramento, eliminación de piezas sueltas y de la posible materia orgánica que pudiera presentar el paramento a rehabilitar.
- Colocación de lámina protectora del paramento, permitiendo el drenaje libre del terreno, y aislando así el relleno granular del material original del lienzo. Así, además, se protege el relleno de NFU's, quedando encapsulado e independiente, lo cual evita posibles riesgos de incendio.
- La continuidad del muro se plantea a partir de taladros con resina epoxi, así como perforaciones en la parte superior del elemento existente para el levantamiento de la cara exterior del muro de contención. Colocación de armadura y hormigonado.
- Colocación de relleno de trasdós, a partir de tongadas de granulado de NFU's. Se establece el orden de mayor a menor diámetro: 5 big bags S<sub>4</sub> + 1 big bag S<sub>3</sub>+2

big bags S<sub>2</sub>. Las capas serán vibradas para evitar oquedades, aumentar la compacidad y favorecer el acomodo de las partículas.

- Coronación del muro de hormigón armado mediante fábrica de ladrillo.
- Colocación de al menos 0,9 m (3 pies) de suelo convencional sobre las capas del granulado de NFU's para evitar o minimizar las deflexiones en la zona de coronación del muro.
- Colocación de forjado unidireccional de viguetas pretensadas y bovedillas de poliestireno expandido, apoyado sobre fábrica de LHD. Pasarela superior del muro.

La presente investigación sólo contempla el estudio de las características del granulado de NFU's. La siguiente fase del estudio de puesta en uso se encuentra en fase de desarrollo por D<sup>a</sup> María Anguita García, en el proyecto de investigación "*Utilización de neumáticos triturados fuera de uso (NFU) en obras de geotecnia*". Los cálculos y las comprobaciones pertinentes se encuentran desarrollándose para confirmar la viabilidad técnica de dicha implementación. En la Ilustración 44 se presenta de manera cronológica la puesta en obra del granulado de NFU's como relleno de trasdosado de muro en la rehabilitación del castillo de Utrera, Sevilla.

Elizabeth Contreras Marín  
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS:  
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU'S)



*Ilustración 44. Puesta en marcha del Granulado de NFU's, relleno de trasdosado de muro en la rehabilitación del castillo de Utrera, Sevilla.*

## **9. VALOR CARACTERÍSTICO DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS**

### *9.1. Aplicación de los valores característicos*

Parte de los objetivos planteados en el proyecto de investigación ha sido el análisis de la variabilidad de las propiedades en el ámbito de la ingeniería de los NFU's, basándose en un amplio estudio bibliográfico y ensayos de laboratorio. Se evaluaron las principales características geotécnicas y se compararon con otras investigaciones de NFU's y materiales convencionales.

Se realizaron una serie de análisis para investigar la presencia y la importancia de la dependencia de las variables características. Todo esto se realizó a partir del coeficiente de variación (COV), que se obtiene a partir de la relación de la media entre la desviación estándar del conjunto de la muestra. En este sentido, cuando se utilizan métodos estadísticos, el Eurocódigo 7 [117] propone calcular los valores característicos de los parámetros geotécnicos sobre el valor medio de la muestra. Se propone una función normal para cada una de las siete muestras y se elige el nivel de confianza  $1-\alpha=90\%$  (siendo  $\alpha$  un valor que depende del intervalo). De esta manera, se obtienen "estimaciones conservadoras" del valor medio de la población a partir del valor medio con una fiabilidad del 95%.

Fue necesario evaluar la cantidad de información que se contenía con el objetivo de establecer la correcta elección de material. En la ilustración 45 se presentan los diferentes escenarios planteados.

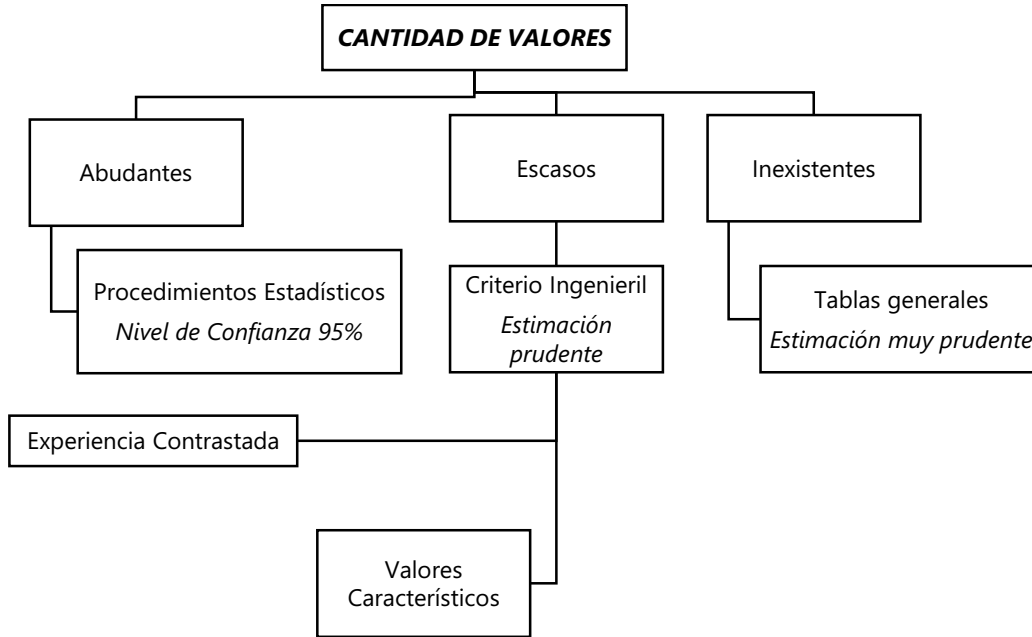


Ilustración 45 Procedimientos de obtención de los valores característicos de los parámetros geotécnicos.  
Fuente [207].

Dada la variabilidad que presentan los resultados del material evaluado y los diferentes tamaños de partícula, no se pueden establecer valores concretos de la combinación del granulado de NFU's. Por ello, se decide realizar un estudio de diferentes tamaños de partícula y sus combinaciones. Al parecer, se hace evidente que la combinación de granulometrías genera una gama de mezclas mejorada, ya que los valores tienden a ser uniformes cuando se trata de una sola granulometría, además de ser menores en relación a los suelos convencionales.

En la selección de los valores característicos para los parámetros geotécnicos se tomó en cuenta lo siguiente:

- La información existente: propiedades globales que se analizaron en el transcurso de la investigación, resultados de pruebas de laboratorio, manuales, proyectos, artículos científicos o tesis del mismo material y mismas condiciones;
- La variabilidad de los resultados de la propiedad medida y otra información relevante a partir, por ejemplo, del conocimiento existente;
- El tipo y el número de pruebas;
- El alcance de los estudios de campo y laboratorio;



De acuerdo con los resultados de Patrick M. Strenk et al. (2007)[71], los resultados del análisis indican que el peso unitario o densidad aparente tienen el valor más bajo del COV, mientras que los parámetros de resistencia al corte y el índice de compresión tienen valores de COV sustancialmente más altos. En dichos resultados se muestra que el peso unitario y el módulo de compresión mostraron la mayor sensibilidad a los cambios en el tamaño máximo de las partículas de los NFU's.

A continuación se exponen los diferentes valores característicos evaluados a partir de las propiedades obtenidas de las muestras.

### 9.2. Valores característicos: base de datos de otras investigaciones de NFU's y materiales convencionales

La tabla 37 muestra el compendio de datos de la documentación científica. El conjunto de datos se ha elegido en función de la similitud de las pruebas realizadas en laboratorio, así como la cantidad de información que aportaban dichos documentos. Se evaluaron las principales características geotécnicas y se compararon con otras investigaciones de NFU's y materiales convencionales. Se establecen las correlaciones existentes en los comportamientos del granulado de NFU's y sus correspondientes valores característicos.

*Tabla 37. Compendio de estudio bibliográfico de los NFU's y materiales convencionales.*

<b>Tamaño (mm)</b>	<b><math>\rho_a</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>W_{A24}</math> (%)</b>	<b><math>\rho_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>C (kPa)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b>E (kPa)</b>	<b>K (m/s)</b>	<b>Referencia</b>
Grava	20-22		15-17		34-45		$> 10^{-2}$	
Arena	18-20		13-16		30-36	-	$10^{-2} - 10^{-5}$	DB-SE-C
Limo	18-20		14-18	-	25-32	4000-	$10^{-5} - 10^{-9}$	[189], [3], [107], [183]
Arcilla	16-22		14-21		16-28	20000	$< 10^{-9}$	
12-50								
100-200 $\leq 305$	11-13		3.16- 7.11	7.6-11.5	19-25	-	1.5-15 ( $10^{-2}$ )	[108]
50	11		6.70	3.94	15	-	-	
50-100	11		6.95	3.73	32	-	-	[143]
100-200	10.6		7.10	3.73	27	-	-	
200-300	11		7.00	3.50	29	-	-	
50 ~ 150	10.8-13.6		8.10-9.90	3.0	30.0			
76	11.3-13.6		5.05-6.00	11.5	19.0			
51	-		6.9	7.7	21.0			
38	11		7.30	8.6	25.0		1.5-15( $10^{-2}$ )	[102]
12	11		-	0	20~34			
10	11-12		-	0	32.0			
0.1 ~ 4.75	11		-	70 ~ 82	6 ~ 15			
TDA (305 -228 )			7.01	3.1	22			
			6.82	8.60	25			
			7.24	11.50	19			
Viruta (12 - 50)	12.1		5.69	7.70	21	2000	-	[107] [183]
			4.95	4.30	16			
			5.89	0	30			

Elizabeth Contreras Marín  
 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS:  
 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU'S)

Granulado(2 - 19)		5.69	0	54				
		5.90	0	54				
		5.89	0	47				
0.01-0.83	11.5	-	-	-	-	-	-	
13-76	-	5.70-7.30	10	27	150-600	5(10 <sup>-2</sup> )		[99]
25-300	11.5-14.5	7.20-9.20		28.50	250-1800			
7		6.92	4.2		692	0.503(10 <sup>-2</sup> )		
25	11 - 13	6.19	4.3	-	29.6	1038	0.598(10 <sup>-2</sup> )	[91]
50		3.18	5.2			1540	0.433(10 <sup>-2</sup> )	
0-10	15	5.00	5.70	-	-	3040	2.1(10 <sup>-5</sup> )	[208]
0.1-1	5.2-9.4	--	5.4-6.1					
0.5-2	59-7.9	38	5.9-6.1					
2-5	59-7.2	23	5.9-6	-	-	-	-	[169]
10-40	5.7-5.9	18	5.7-5.9					
2-8	11.5 11.4	11.9	5.90-6.40	-	29	-	-	[177]
50		2	4.69-6.08	7	23.1	1130	2.9 - 23.5 (10 <sup>-2</sup> )	
38		1.9	6.01-8.03	7	26.5	1250	4.8-15.4 (10 <sup>-2</sup> )	
19	10.8-12.7	2	4.70-8.33	11	38.5	1120	4.9 - 59.3 (10 <sup>-2</sup> )	[80]
10		4	6.22-8.08	17	40.7	770	0.58-6.9 (10 <sup>-2</sup> )	
2		5.3	5.62-5.98	0	41.7	-	.034 (10 <sup>-2</sup> )	
25 - 50	11-13		3.2 - 7.1	7.60-11.50	19-25	770-1250	-	[209]
≥ 12	-		5.68	7.04	27	-		[79]
20	12		5.80	-	-	-		[210]
≥10	12 - 13		4-9	0 5.70 8.10	32 42 45	-		[211]
2	11				44	450 - 820		
9.5	12				50	350 - 600		
19	11				54	430 - 580	-	[212]
38	10				57	580 - 690		
25				15.0	26.5			
50	13		-	7.0	34	200 - 1400	5 (10 <sup>-4</sup> )	[104]
100				10.0	29			
0.8 - 20			4.90 - 5.90	6 - 32	3.30 -	-		
10 - 50	-		5.10 - 6.40	11 - 38	25.40	253 - 485		[71]
20 - 400			4.70 - 6.30	19 - 39	4.30 -	130 - 373		
					13.20			
12-50	11		12.97	82	33		2.5 (10 <sup>-5</sup> )	
Arena	27	-	17.40	0	15	-	2 (10 <sup>-5</sup> )	[179]
Arena- 50%-12-50	19		6.24	26	45		5 (10 <sup>-6</sup> )	
12 - 50			5.90	0.0	30			
Arena - 10% 12 - 50			15.60	2.0	46			
Arena - 20% 12 - 50	-	-	14.50	2.0	50	-		[213][175]
Arena - 30% 12 - 50			13.30	2.0	52			

Para la recolección y el procesado de datos de los valores característicos de la bibliografía estudiada, se han tomado los siguientes criterios:

- Se realiza una división de dos conjuntos de datos: por una lado se evalúan los resultados de partículas inferiores a 12 mm, y por otro el conjunto de datos de partículas TDA (12 -300 mm). El objetivo es comparar buscando similitudes con los valores obtenidos durante la fase experimental llevada a cabo en esta investigación.
- Se ha utilizado el criterio de fallo de Mohr-Coulomb, relacionado con los parámetros geotécnicos de mayor relevancia: la cohesión y el ángulo de

rozamiento. También se analiza la compresibilidad del NFU's a partir de las densidades compactadas alcanzadas tras la compactación.

- Se descartan los valores que no pertenecen al conjunto de datos evaluados, para evitar falsos positivos.

En relación al conjunto de datos bibliográfico de los NFU's, se encontró una mayor disposición de resultados para partículas mayores. Para los valores de TDA (12 -300 mm) se contó con una base de datos de 35 muestras, mientras que para partículas inferiores a 12 mm se contó con 15 muestras. Para la validación de los datos se observan diferencias mínimas en la comparativa de las dos clases evaluadas. En la tabla 38 se expone una tabla resumen de los resultados obtenidos. Se observa poca sensibilidad a los cambios de tamaños de las partículas de los NFU's, mostrando valores característicos muy similares.

Se ha observado mayor dispersión de datos en el parámetro de la cohesión con coeficiente de variación (COV) entre 0.72-1.09, mientras que el ángulo de rozamiento presenta prácticamente el mismo valor de COV entre 0.36-0.39.

*Tabla 38. Resumen de Valores característicos de la base de datos bibliográfico de los NFU's.*

<b>MUESTRA</b>	<b>Granulado &lt;12 mm</b>			<b>TDA (12 -300 mm)</b>		
	$\rho_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\phi$ (°)	$\rho_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\phi$ (°)
<i>n° datos</i>	15.00	12	16	32	30	35
<i>MEDIA</i>	5.89	6.15	34.50	7.01	8.61	27.50
<i>COV</i>	0.21	1.09	0.36	0.67	0.72	0.39
<i>Val.mean</i>	5.34	2.69	29.11	5.60	6.69	24.42

Los valores medios de la cohesión se encuentran entre 6.15-8.61 kPa, mientras que los valores característicos oscilan en un rango de 2.69-6.69 kPa, con COV alto entre 0.36-0.72. Por otro lado, los valores de ángulo de rozamiento presentan mayor diferencia entre los resultados de la media y los valores característicos, con rangos de 34.50-27.50 y 29.11-24.42 respectivamente. Se podría afirmar que partículas de menor diámetro generan mayores ángulos de rozamiento. Se observó un 15% de aumento en las partículas inferiores a 12 mm.

### 9.2.1. Valores característicos de los granulados de NFU's

Se ha identificado en la generación de la base de datos para la obtención de valores característicos, que para conseguir un resultado confiable es necesario la obtención de un mínimo de 6 valores por muestra evaluada. Para la determinación de los parámetros geotécnicos de los granulados de NFU's, se ha decidido generar una base de datos del compendio de 126 valores a evaluar. Con ello se espera poder tener una amplia gama de valores, que en comparación con los resultados obtenidos en la literatura estudiada den un panorama certero del valor característico que guarda dicho material.

Las tablas resumen 39 y 40 muestran los resultados de la obtención de los valores característicos de las combinaciones de granulados de NFU's evaluadas en esta investigación (Ilustraciones 46, 47 y 48).

Tabla 39. Resumen de valores característicos del ensayo Próctor de Densidad seca máxima  $\rho_d$  ( $\text{kN/m}^3$ ) de los Granulados de NFU's.

<b>DENSIDAD SECA MÁXIMA <math>\rho_d</math> (<math>\text{kN/m}^3</math>)</b>						
<b>MUESTRA</b>	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
<i>nº muestras</i>	2	10	10	10	4	2
<i>MEDIA</i>	6.20	6.10	6.28	6.05	6.07	6.07
<i>COV</i>	0.02	0.03	0.05	0.09	0.03	0.04
<i>Val.mean</i>	5.57	5.97	6.10	5.72	5.93	5.72

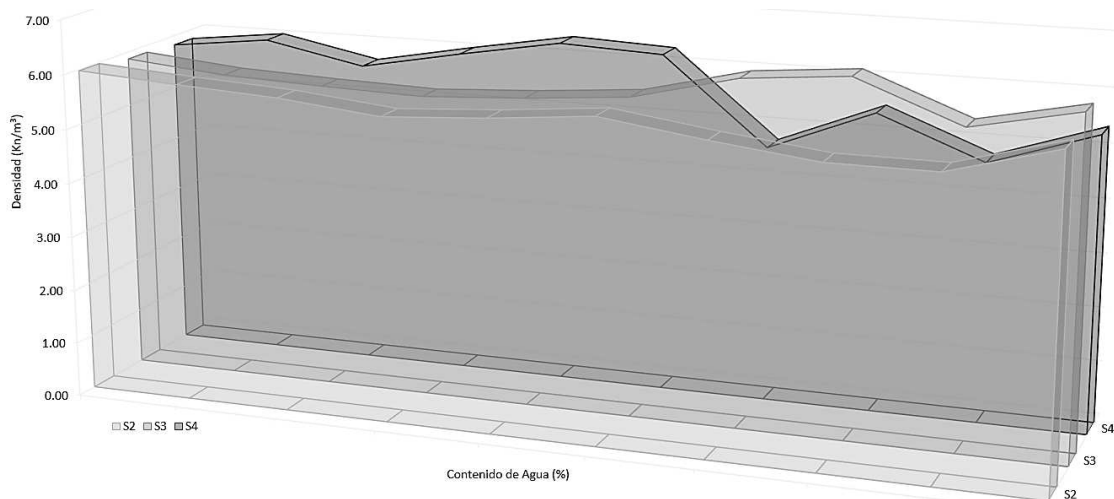


Ilustración 46. Gráfico de valores característicos de ensayo Próctor de Densidad seca máxima  $\rho_d$  ( $\text{kN/m}^3$ ) de los Granulados de NFU's.

Elizabeth Contreras Marín  
 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS:  
 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU'S)

Tabla 40. Resumen de valores característicos del ensayo de cizallamiento directo de los granulados de NFU's: Cohesión (kPa) y Ángulo de rozamiento (°).

MUESTRA	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>
<b>COHESIÓN (kPa)</b>							
MEDIA	14.52	17.42	19.34	22.28	13.75	18.12	20.72
COV	0.20	0.32	0.27	0.23	0.36	0.28	0.36
Val.mean	12.13	12.80	14.99	17.99	9.72	13.99	14.54
<b>ÁNGULO DE ROZAMIENTO (°)</b>							
MEDIA	24.56	24.17	23.00	22.97	24.65	24.96	24.86
COV	0.05	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08
Val.mean	23.58	22.91	22.09	21.90	23.24	23.53	23.22

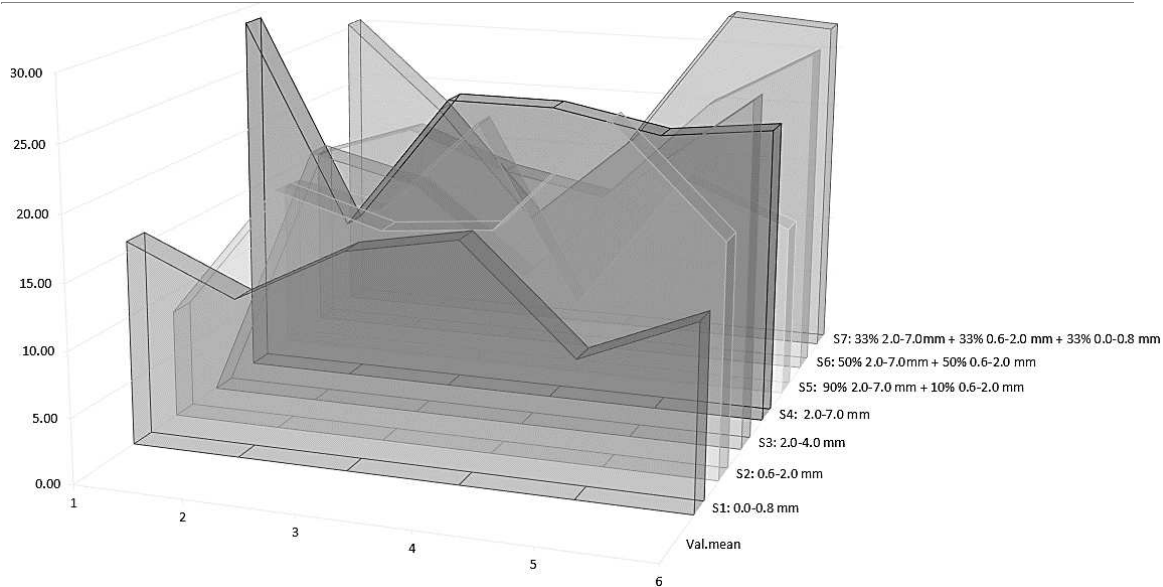


Ilustración 47. Gráfico de valores característicos del ensayo de cizallamiento de los Granulados de NFU's: Cohesión (kPa).

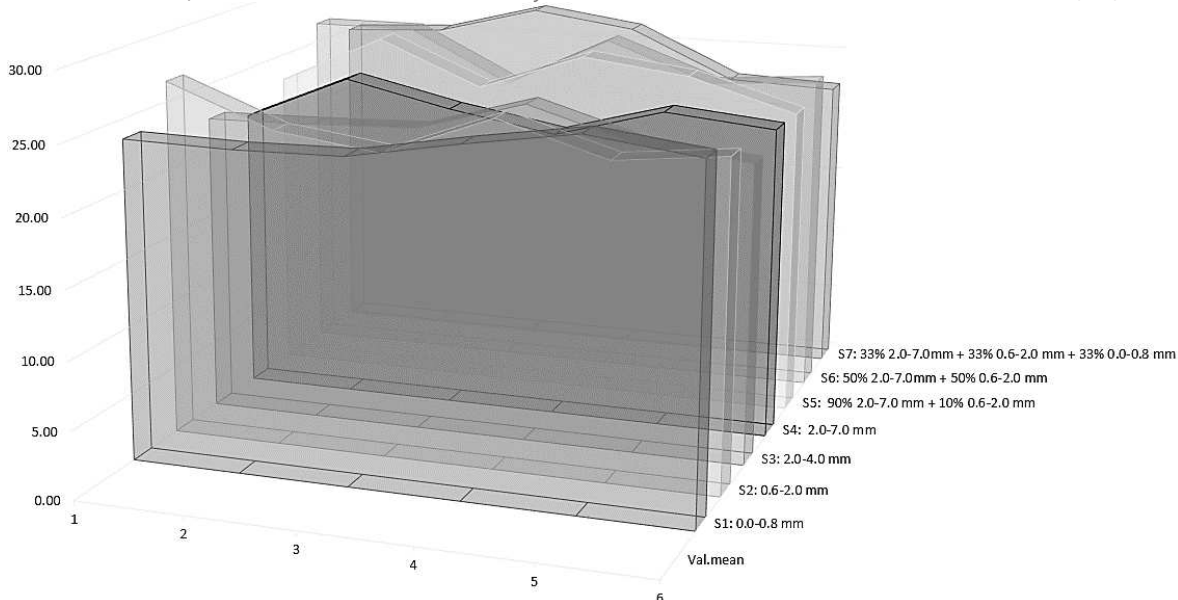


Ilustración 48. Gráfico de valores característicos del ensayo de cizallamiento de los Granulados de NFU's: Ángulo de rozamiento (°).

En el procesado de datos evaluados, se obtiene un rango de dispersión reducido en los valores característicos de la densidad seca máxima ( $\rho_d$ ), rango de 5.57-6.10 kN/m<sup>3</sup>, con

un COV mínimo entre 0.02-0.09. Se puede afirmar que la combinación de granulometrías no repercute en los valores resultantes.

En relación a los valores característicos de los ensayos de cizallamiento, se encontró que los valores de la cohesión presentan rangos de valores con una dispersión alta, mientras que el ángulo de cohesión presenta una dispersión baja. Estos resultados son muy similares al comportamiento habitual de los suelos. Se observa que el rango de valores medios de la cohesión se encuentra entre 13.75-22.28 kPa, mientras que los valores característicos se mueven en un rango de 9.72-17.99 kPa, con COV alto entre 0.36-0.20. Por otro lado, los valores de ángulo de rozamiento presentan poca diferencia entre los resultados de la media y los valores característicos, rangos de 22.97-24.96 y 22.09-23.58 respectivamente. Se han encontrado valores de COV bajos, con rangos de 0.05-0.08.

El parámetro que mayor dispersión presentó fue la cohesión, con un menor nivel de confianza. Los resultados ponen de manifiesto la importancia de utilizar valores de estimaciones moderadas o en su defecto, partir de un procesado de datos con un número considerable de resultados para encontrar un valor característico lo más cercano a la predicción real del comportamiento.

Los valores de ángulo de rozamiento presentaron un mayor nivel de confianza, encontrando un modelo de comportamiento predecible en el conjunto evaluado.

Se observó un comportamiento no lineal en la caracterización, al no mostrarse una relación clara entre el tamaño de la partícula y los parámetros geotécnicos. Se vislumbra que el rango de tamaños de partícula (0.8-7.0 mm) y sus posibles combinaciones, generan un modelo de comportamiento similar. Es también destacable que las combinaciones de  $S_5$ ,  $S_6$  y  $S_7$  presentan ligeramente una mayor sensibilidad, que genera un mejor comportamiento respecto al resto de las muestras evaluadas.

### 9.3. *Factores de equivalencia de los parámetros geotécnicos del granulado de NFU's y comparativa con suelos convencionales.*

Los factores de equivalencia se utilizan para convertir las características que guardan el conjunto de datos promedio de la muestra de un tipo específico, como pueden ser:

compresibilidad de las muestras, densidades secas, cohesión, ángulo de rozamiento y permeabilidad. La muestra global se define como las características necesarias para su implementación general. Es posible realizar comparaciones entre características y uso de diferentes tipos de muestras.

Según las investigaciones de Tommy Edeskär (2006) [80] los factores de NFU's de mayor influencia en el comportamiento de las propiedades técnicas experimentadas en laboratorio son la tensión y el tamaño de los NFU's. Los factores menores, pero aún importantes, son la recarga y la compactación, que aumentan la densidad y la rigidez y reducen la compresión. Los parámetros de cohesión ( $c$ ) y ángulo de fricción ( $\phi$ ) para la evaluación de la resistencia al cizallamiento se ven muy afectados por los criterios de deformación utilizados. La recarga tiene un efecto similar al de la compactación en los fragmentos de NFU's.

A continuación se realizan los factores de equivalencia para los valores característicos de los parámetros geotécnicos del granulado de NFU's, de acuerdo a las siguientes bases de datos:

- Propiedades del NFU's de acuerdo con la Comisión Europea de Normalización CWA 14243-2002.
- Comparativa con suelos convencionales de acuerdo con el Documento Básico SE-C Cimientos (DB-SE-C), 2019.
- Valores característicos de los NFU's de bibliografía estudiada.
- Valores característicos de los NFU's deducidos en esta investigación.

Se toman los valores medios de las propiedades con baja dispersión de resultados o intervalos uniformes, así como los correspondientes valores característicos mencionados con anterioridad en el capítulo 9.

De acuerdo con los valores obtenidos en el análisis del conjunto de datos, así como la Comisión Europea de Normalización CWA 14243-2002 [184], las propiedades en el ámbito de la ingeniería para el granulado de NFU's se presentan en la siguiente tabla 41:

*Tabla 41. Factores de equivalencia para los valores característicos de los parámetros geotécnicos del granulado de NFU's*

<b>FACTORES DE EQUIVALENCIA PARA LOS VALORES CARACTERÍSTICOS</b>					
<b>CARACTERÍSTICA</b>	<i>Propiedades del granulado de NFU's (expuestas en CWA 14243-2002) [184]</i>	<i>Valores característicos de los suelos convencionales</i>	<i>Valores característicos de los NFU's en bibliografía</i>		<i>Valores característicos de los NFU's en esta investigación</i>
		DB-SE-C [189]	< 12 mm	12-300 mm	
<i>Gravedad específica</i> $\rho_a$ (kN/m <sup>3</sup> )	±11.4-12.7 en comparación con el suelo a 22-28 La mitad del peso unitario típico de la grava	20-22 18-20 18-20 16-22	11	12	10-12
<i>Densidad compactada</i> $\rho_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	NFU's : 2.3-4.8 Suelo: 15.6-19.5 1/3 a 1/2 menos denso que el relleno granular	15-17 13-16 14-18 14-21	5.34	5.60	5.57-6.10
<i>Características de fricción</i> C (kPa)	Mayor comparado con el suelo	-	2.69	6.69	9.72-17.99
<i>Características de fricción</i> $\phi$ (°)	Mayor comparado con el suelo	34-45 30-36 25-32 16-28	29.11	24.42	22.09-23.58
<i>Permeabilidad</i> K (m/s)	Superior a 10 <sup>-2</sup> m/s	>10 <sup>-2</sup> 10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>-5</sup> 10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-9</sup> < 10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>-5</sup> 5	10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>-5</sup> 5	6.85-11(10 <sup>-4</sup> )
<i>Módulo en rango elástico</i> E (kPa)	1/10 de la arena	4000-20000	635-3040	251-2000	279-1098
<i>Relación de Poisson</i>	0.2-0.3 correspondiente a los valores de K <sub>0</sub> de 0.3-0.4				k <sub>0</sub> 0.61
<i>Compresibilidad</i>	3 veces más comprimible que el suelo				u 0.38
<i>Otros parámetros a considerar:</i>					
- <i>Aislamiento térmico: 8 veces más eficaz que la grava</i>					
- <i>Tensión vertical: En bases débiles: menor que el relleno granular</i>					
- <i>Durabilidad: No biodegradable</i>					
- <i>Presión de la tierra: Bajo en comparación con el suelo o la arena, hasta un 50% menos</i>					
- <i>Esfuerzo horizontal: Sobre una base débil: más bajo que con un relleno convencional</i>					

A lo largo de la investigación se han analizado y comparado las características evaluadas en otros estudios y las observadas en el laboratorio durante la caracterización de los NFU's, con el objetivo de determinar los parámetros geotécnicos que puedan aportar predicciones de comportamientos durante la implementación en obra.

De los factores de equivalencia se puede concluir que los resultados muestran valores muy similares entre la bibliografía y esta investigación. Se observan valores de cohesión ligeramente superiores y valores de ángulo de rozamiento algo inferiores que la bibliografía estudiada. Para la validación de los datos se observan diferencias mínimas al



comparar los resultados de las partículas inferiores a 12 mm con el conjunto de datos de partículas TDA (12 -300 mm).

Se confirma que los valores de la gravedad específica ( $\rho_a$ ) son la mitad del peso unitario típico de la grava. En esta investigación se encontraron valores entre 10-12 kN/m<sup>3</sup>, similares en el conjunto de las muestras. Son valores muy cercanos a la mitad del valor característico de las gravas, que oscilan entre 20-22 kN/m<sup>3</sup>.

Se obtiene un bajo rango de dispersión en los valores característicos de la densidad compactada ( $\rho_d$ ), tomando como válido el valor resultante. El parámetro que mayor dispersión de resultados presentó fue la cohesión, con valores superiores a los encontrados en la bibliografía. Por otro lado, la cohesión presentó valores muy similares al conjunto de datos de partículas TDA (12-300 mm).

En la comparativa con suelos convencionales de acuerdo con los rangos establecidos en el DB-SE-C (2019), se confirma que los valores de la densidad compactada ( $\rho_d$ ) se encuentran entre un tercio y la mitad de los valores típicos de las arenas y las gravas. En cuanto a los parámetros geotécnicos, se encontró que el conjunto de las muestras evaluadas presenta valores inferiores en comparación con los suelos convencionales, con valores muy similares a los que se obtienen de los suelos arcillosos o con limos, con rangos inferiores a 30° para el ángulo de rozamiento.

El conjunto presenta resultados de coeficientes de permeabilidad característicos de suelos relacionados con las arenas limpias y mezcla de grava y arenas limpias ( $10^{-2} - 10^{-5}$  m/s), dándose como razonables los valores obtenidos. Los módulos elásticos del conjunto de las muestras son sensiblemente inferiores a los valores obtenidos para los suelos convencionales, confirmando que se encuentra en el rango del 10% del valor propio de la arena.

## 10. CONCLUSIONS

### 10.1. Conclusions regarding the methodology used

#### 10.1.1. Limits of the developed research

**\_Recycled materials generate mistrust.** A greater number of investigations and knowledge of the implementation of the granulated NFU's is necessary, to contrast results and generate deeper discussions regarding the scope of action. A limitation was found in relation to the existence of projects and research linked to implementing recycled materials in new constructions. In this sense, the first novelty that this document exposes is the evaluation of the geotechnical parameters of the NFU granules, carrying out correlations of the data obtained in the laboratory with applications in the field.

**\_The dispersion of results.** In general, research regarding the implementation of NFUs in geotechnical works has focused on the study of crushed sizes between 76 mm and 305 mm, and chips that usually range between 12 mm and 76 mm. In this sense, the present investigation exposes a detailed range of particles smaller than 12 mm, which had not generally been detailed in the literature.

**\_Lack of legislation on recycled materials.** One of the problems that hinders the development of these technologies in the EU is the absence of procedures and design manuals that allow their correct implementation. Currently in Spain, there are no standards that regulate NFU's granules, being one of the main reasons why its use in geotechnical works is not as widespread as with other materials. The promotion of quality standards for materials derived from NFU's is presented as a great step towards obtaining products that meet the performance required for its implementation.

**\_Economic and environmental aspects of the implementation of NFU granules.** This research is part of the line of research associated with the field of Integrated Tire Management Systems. In this way, it is intended to establish a protocol based on the characterization of NFU granules ( $\leq 12\text{mm}$ ), for use in geotechnical applications, thus constituting a line of research that has a strong link with economic and environmental sustainability.

## 10.2. *Advances achieved in the characterization of NFU granules*

### 10.2.1. Selection of elements

**\_Regarding the treatment plants.** The choice of the study framework in the experimental phase in the laboratory was based on the two NFU treatment plants in Andalusia, Spain. The selection of the samples allowed to carry out measurements and evaluations of a representative set, so that characteristic values of an adequate sample could be generated.

**\_Regarding laboratory experimentation.** It is assumed that the granules of NFU's have properties that generate a range of possibilities to be used to replace conventional aggregates in applications in the field of geotechnics. In this way, it is understood that the combination of laboratory tests with statistical calculation verifications allows to validate this positioning.

A protocol was carried out based on the characterization of a detailed range of particle sizes ( $\leq 12$  mm) of 100% rubber, without the presence of metal or textile fragments and that could also be analyzed in the machinery of the Soil Mechanics Laboratory of the Higher Technical School of Architecture of Seville.

Given the variability presented by the results of the evaluated material and the different particle sizes, it is not possible to establish specific values for the combination of the NFU's granules. Therefore, it is decided to carry out a study of different particle sizes and their combinations. The combination of granulometries generates an improved range of mixtures, the values tend to be uniform when it comes to a single granulometry, in addition to being lower than conventional soils. It is observed that sample S7 (33% 2.0-7.0 + 33% 0.6-2.0 + 33% 0.0-0.8) is the only combination that meets the requirements of well graded, and the improvement of combinations in the rest of the tests is confirmed.

**Regarding research with particles <12mm.** There was no optimal niche of results to make comparisons. Previous investigations show a wide range of particle sizes (0.8 mm to 400 mm), with very few studies focused on the geotechnical characterization of particle sizes smaller than 12 mm.

### 10.2.2. Results obtained

It is shown that physical properties, such as specific gravity or bulk density, compacted density, water absorption and permeability, do not show sensitivity to fragment size change and their combinations. The results were found to be in a uniform range, and are comparable to those obtained by other researchers, even on the TDA particle dataset (12-300 mm).

One of the most notorious differences between conventional soils and the NFU's granules are the apparent densities or, alternatively, the apparent specific weight, which is reflected in the volume occupied by the sample. Considering a range of sand values between 18-20 kN/m<sup>3</sup> and NFU's values between 4.3-4.5 kN/m<sup>3</sup>, differences between four and almost five times less than sand are observed. This fact makes NFU granules a feasible material for use as light filler. However, it is necessary to take into account the high percentages of voids (>50%) in the samples.

Specific gravity ( $\rho_a$ ) values are half the typical unit weight of gravel. In this investigation, values between 10-12 kN/m<sup>3</sup> were found, similar in all the samples. These are values very close to half of the characteristic value of the gravels, which range between 20-22 kN/m<sup>3</sup>.

A low range of dispersion is obtained in the characteristic values of the maximum dry density ( $\rho_d$ ), range of 5.57-6.10 kN/m<sup>3</sup>, with a minimum VOC between 0.02-0.09. The combination of granulometries does not affect the resulting values.

Samples S6 (50% 2.0-7.0mm + 50% 0.6-2.0mm) and S7 (33% 2.0-7.0mm + 33% 0.6-2.0mm + 33% 0.0-0.8mm) have the most shear strength parameters. high, due to the improvement of the granulometric distribution. However, these improvements are not considered significant in relation to the range of values compared. The set of evaluated values presents values lower than those obtained with conventional soils, with values very similar to those obtained from clayey or silt soils, with ranges of less than 30° for the angle of friction.

The parameter with the greatest dispersion was cohesion, with a lower confidence level. In general, it is observed that the range of average values of cohesion is between 13.75-

22.28 kPa, while the characteristic values move in a range of 9.72-17.99 kPa, with high VOC between 0.36-0.20. On the other hand, the friction angle values present little difference between the mean results and the characteristic values, ranges of 22.97-24.96 and 22.09-23.58, respectively. Low VOC values have been found, ranging from 0.05-0.08.

In the oedometric tests carried out in this investigation, it was observed that most of the deformations were in the elastic range. With a high recovery, the relationship between  $C_c$  and  $C_s$  is in the range between 1-3, well below what occurs in clays, with ranges between 4-10. The elastic modules of the set of samples are significantly lower than the values obtained for conventional soils. At a confining pressure of 100 kPa, the modulus of elasticity presents values between 279.02-1097.75 kPa, confirming that it is in the range of 10% of the sand's own value.

From the permeability tests, it is observed that the values of S4 (2.0 – 7.0) and S5 (90% 2.0 – 7.0 + 10% 0.6 – 2.0) are similar. It is estimated that the distribution improvement of the sample S6 (50% 2.0 – 7.0 + 50% 0.6 – 2.0) and S7 (33% 2.0-7.0 + 33% 0.6 -2.0 + 33% 0.0-0.8) increases permeability due to the accommodation of the particles, allowing better drainage. Average permeability coefficient values between 6.85-11 ( $10^{-4}$  m/s) were obtained. This increase is considered negligible for the set of data evaluated.

A non-linear behavior was observed in the characterization, as there was no clear relationship between the size of the particle and the geotechnical parameters. It appears that the range of particle sizes (0.8-7.0 mm) and their possible combinations generate a model of similar behavior. It is also noteworthy that the combinations of S5, S6 and S7 show slightly better behavior than the rest of the samples evaluated.

From the equivalence factors it can be concluded that the results show very similar values between the bibliography and this research. Higher cohesion values and slightly lower friction angle values are observed than the literature studied. For data validation, minimal differences are observed when comparing the results for particles smaller than 12 mm with the TDA (12-300 mm) particle dataset.

It is ruled out that the variation in the size of the NFU's granules may have an effect on their behavior, with the different combinations carried out in this investigation. In short comparison ranges, the results present similar values, with difference ranges  $\pm 10\%$ .

In relation to the comparison with conventional soils established in the DB-SE-C (2019), in terms of geotechnical parameters, it was found that the set of samples evaluated have lower values, very similar to those obtained from soils. clayey or with silt, with ranges of less than  $30^\circ$  for the friction angle.

In general, a prior study of NFU granules is required for any implementation in geotechnical works. From the studies carried out, it seems that the combination of three granulometric spindles presents better behaviors, being the sample S7 (33% 2.0-7.0+ 33% 0.6-2.0 + 33% 0.0-0, 8) the one that exhibited the best behavior in the set of samples evaluated.

Based on the laboratory tests to obtain the geotechnical parameters, a study of between 6 and 12 samples for each of the combinations to be studied is recommended for characterization. These considerations will be defined according to the scale, importance and character of the work.

### 10.2.3. Considerations for recommended applications

This experimentation only contemplates the sections corresponding to the main properties that the NFUs must meet for their implementation. The criteria for acceptance or rejection based on calculations are in the development phase by Ms. María Anguita García, within the research project "Use of shredded tires out of use (NFU) in geotechnical works".

From a general point of view, all the samples evaluated do not exceed the specifications for high performance. It was decided to study practical cases where the benefits are moderate and the characteristics of the material may be useful for its implementation.

It is observed that only 6% of the waste is used for applications in the field of civil engineering in the period 2005-2020. In this sense, the present investigation shows the use of NFU's granules in applications with greater repercussion of volume used.

In the literature, it is stated that the applications that have the greatest impact are those of fillers, due to the large amounts of material that are required. On the other hand, road works are visualized, especially road embankments, where the repercussion is greater, since the execution of any linear work requires in many cases the use of a large amount of material. It seeks to find the relationship between the characteristics of the NFU's granulate and its correct application.

From another perspective, it is outlined that the proposed applications will minimize the use of conventional aggregates, such as sand and gravel, in embankment layers or as backfill for retaining walls, thus reducing and even eliminating the environmental impact of extracting stone aggregates.

Regarding the analysis of the technical properties that the NFU's granules have for their different applications, the NFU's granulometry has a great influence on the characteristics and behavior in its implementation. It is important to highlight that the granulometric range that does not contain steel embedded in the rubber has been evaluated, thus avoiding possible oxidation problems. All samples are considered to have a uniform particle size distribution, which means that the particles are almost the same size.

In relation to the compaction tests in the laboratory with the NFU's fragments, it was shown that the difference in relation to the compaction energy in the results is negligible, thus confirming that it has little influence on the maximum densities obtained. This information should be considered in the choice of compaction equipment. In most of the investigations it was found that the most suitable machinery to carry out the compaction of NFU's is the vibrating smooth roller.

Considering a compacted density of conventional soils between 14-21 kN/m<sup>3</sup> and the results obtained from the samples tested in conjunction with the bibliography, in a range of 5.27-6.10 kN/m<sup>3</sup>, it is stated that the weight of the NFU's is less than half the unit weight of the soils. Taking into account the above findings, it can be seen that a reduction in weight (up to 68%) is possible when NFU granules are adopted as a total replacement in the substructure design. An additional benefit of reducing the weight of soil mixes with backfill material is that it could result in reduced settlement due to less overburden pressure.

In the hydraulic properties of the NFU's evaluated in this investigation, average coefficients of permeability between  $6.85-11 \times 10^{-4}$  m/s were found. According to the CTE-DB SE-C: 2019, the mixtures present results of coefficients of permeability characteristic of soils with adequate drainage for implementation in engineering works.

From the results of the filter material analysis of the NFU's granule samples with respect to some types of soil as fill material, it is observed that the set of samples satisfies the requirements of a good filter material, allowing adequate flow of the water towards the drainage pipe in the case of a fill of clayey sands (SC). Judging by the results, samples S2 through S6 could be used in standard fills; Loamy sands (SM), silty gravels (GM), silt-clay gravels with sands (GC-GM). Sample S1 is considered as a good option for fills with clays (CL; CH), due to the good particle size ratio that the filter material maintains with the fill. For other types of fill material, it is advisable to carry out a detailed analysis for its correct operation, which allows adequate drainage.

The compressibility analyzes of the NFUs indicate that the modulus of elasticity is in the order of 2 to 3 times less than the modulus of the granular soil. These results are confirmed in this investigation: for a confining pressure of 100 kPa, the modulus of elasticity presents values between 279-1098 kPa. Therefore, it is confirmed that NFU granules require a preload or confining pressure, to avoid or minimize possible deflections.



### *10.3. Future lines of research*

#### 10.3.1. Continuity of the experimental phase in the installation of the material

In the next phase of the experimentation, the generation of computer models that allow the analysis of the results obtained from the characterization of the material is contemplated. The PLAXIS program is implemented and the results are compared with the calculations obtained by the manual method. The software used considers plane strain and axial symmetry models. In addition, it allows the use of different soil behavior models, such as the Mohr Coulomb linear elastic (white soil hardening) and slip models, as has already been done in other similar studies.

The criteria for acceptance or rejection based on calculations are in the development phase by Ms. María Anguita García, within the research project "Use of shredded tires out of use (NFU) in geotechnical works".

## 10. CONCLUSIONES

### 10.1. Conclusiones referentes a la metodología empleada

#### 10.1.1. Límites de la investigación desarrollada

**\_Los materiales reciclados generan desconfianza.** Es necesario un mayor número de investigaciones y conocimiento de la implementación del granulado de NFU's, para contrastar resultados y generar discusiones más profundas respecto al ámbito de actuación. Se encontró una limitación en relación a la existencia de proyectos e investigaciones vinculados a implementar materiales reciclados en las nuevas construcciones. En este sentido, la primera novedad que expone el presente documento es la evaluación de los parámetros geotécnicos de los granulados de NFU's, llevando a cabo correlaciones de los datos obtenidos en el laboratorio con aplicaciones en campo.

**\_La dispersión de resultados.** En general, las investigaciones referentes a la implementación de NFU's en obras de geotecnia se han centrado en el estudio de tamaños de triturado entre 76 mm y 305 mm, y de virutas que suelen oscilar entre 12 mm y 76 mm. En este sentido, la presente investigación expone una gama detallada de partículas menores de 12 mm, que generalmente no se había detallado en la literatura.

**\_Falta de legislación en los materiales reciclados.** Uno de los problemas que obstaculiza el desarrollo de estas tecnologías en la UE es la ausencia de procedimientos y manuales de diseño que permitan de manera correcta su implementación. Actualmente en España, no existen normas que regulen los granulados de NFU's, siendo una de las principales razones por las que su empleo en obras de geotecnia no está tan extendido como con otros materiales. El fomento de estándares de calidad para materiales derivados de NFU's se presenta como un gran paso hacia la obtención de productos que satisfagan las prestaciones requeridas para su implementación.

**\_ Aspectos económicos y medioambientales de la implementación de granulados de NFU's.** La presente investigación se enmarca en la línea de investigación asociada al ámbito de los Sistemas Integrados de Gestión de Neumáticos. De este modo, se pretende

establecer un protocolo basado en la caracterización de los granulados de NFU's ( $\leq 12\text{mm}$ ), para el uso en aplicaciones geotécnicas, constituyendo así una línea de investigación que tiene una fuerte vinculación con la sostenibilidad económica y medioambiental.

## 10.2. *Avances alcanzados en la caracterización de los granulados de NFU's*

### 10.2.1. Selección de elementos

**\_Respecto a las plantas de tratamiento.** La elección del marco de estudio en la fase experimental en laboratorio se basó en las dos plantas de tratamiento de NFU's en Andalucía, España. La selección de las muestras permitió realizar mediciones y evaluaciones de un conjunto representativo, de manera que se pudieron generar valores característicos de una muestra adecuada.

**\_Respecto a la experimentación en laboratorio.** Se parte de que el granulado de NFU's posee propiedades que generan un abanico de posibilidades para ser utilizados en sustitución de áridos convencionales en aplicaciones del ámbito de la geotecnia. De este modo, se entiende que la combinación de ensayos de laboratorio con verificaciones de cálculo estadístico permite validar este posicionamiento.

Se realizó un protocolo basado en la caracterización de un rango detallado de tamaños de partículas ( $\leq 12\text{ mm}$ ) de 100% caucho, sin presencia de fragmentos de metal ni textil y que además pudiera analizarse en la maquinaria del Laboratorio de Mecánica del Suelo de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla.

Dada la variabilidad que presentan los resultados del material evaluado y los diferentes tamaños de partícula, no se pueden establecer valores concretos de la combinación del granulado de NFU's. Por ello, se decide realizar un estudio de diferentes tamaños de partícula y sus combinaciones. La combinación de granulometrías genera una gama de mezclas mejorada, los valores tienden a ser uniformes cuando se trata de una sola granulometría, además de ser inferiores a los suelos convencionales. Se observa que la muestra  $S_7$  (33% 2.0-7.0 + 33% 0.6-2.0 + 33% 0.0-0.8) es la única combinación que

cumple con los requisitos de bien graduada, y se confirma la mejora de combinaciones en el resto de ensayos.

**Respecto a las investigaciones con partículas <12mm.** No se contaba con un nicho de resultados óptimo para realizar comparativas. Las investigaciones anteriores muestran un amplio rango de tamaños de partículas (0,8 mm a 400 mm), siendo muy escasos los estudios centrados en la caracterización geotécnica de los tamaños de partículas inferiores a 12 mm.

#### 10.2.2. Resultados obtenidos

Se demuestra que las propiedades físicas, tales como la gravedad específica o densidad aparente, la densidad compactada, la absorción de agua y la permeabilidad no muestran sensibilidad al cambio de tamaño de fragmentos y a sus combinaciones. Los resultados se encontraron en un rango uniforme, y son comparables a los obtenidos por otros investigadores, incluso en el conjunto de datos de partículas TDA (12-300 mm).

Una de las diferencias más notorias entre los suelos convencionales y el granulado de NFU's son las densidades aparentes o en su defecto el peso específico aparente, que se refleja en el volumen ocupado por la muestra. Considerando un rango de valores de la arena entre 18-20 kN/m<sup>3</sup> y valores de NFU's entre 4.3-4.5 kN/m<sup>3</sup>, se observan diferencias entre cuatro y casi cinco veces menor que la arena. Este hecho hace que los granulados de NFU's sean un material factible para su uso como relleno ligero. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta los altos porcentajes de vacíos (>50%) en las muestras.

Los valores de la gravedad específica ( $\rho_a$ ) son la mitad del peso unitario típico de la grava. En esta investigación se encontraron valores entre 10-12 kN/m<sup>3</sup>, similares en el conjunto de las muestras. Son valores muy cercanos a la mitad del valor característico de las gravas, que oscilan entre 20-22 kN/m<sup>3</sup>.

Se obtiene un bajo rango de dispersión en los valores característicos de la densidad seca máxima ( $\rho_d$ ), rango de 5.57-6.10 kN/m<sup>3</sup>, con un COV mínimo entre 0.02-0.09. La combinación de granulometrías no repercute en los valores resultantes.

Las muestras  $S_6$  (50% 2.0-7.0mm + 50% 0.6-2.0 mm) y  $S_7$  (33% 2.0-7.0mm + 33% 0.6-2.0 mm + 33% 0.0-0.8 mm) tienen los parámetros de resistencia al corte más altos, debido a la mejora de la distribución granulométrica. Sin embargo, estas mejoras no se consideran significativas en relación al rango de valores comparado. El conjunto de los valores evaluados presenta valores inferiores a los obtenidos con suelos convencionales, con valores muy similares a los que se obtienen de los suelos arcillosos o con limos, con rangos inferiores a  $30^\circ$  para el ángulo de rozamiento.

El parámetro que mayor dispersión presentó fue la cohesión, con un menor nivel de confianza. En general, se observa que el rango de valores medios de la cohesión se encuentra entre 13.75-22.28 kPa, mientras que los valores característicos se mueven en un rango de 9.72-17.99 kPa, con COV alto entre 0.36-0.20. Por otro lado, los valores de ángulo de rozamiento presentan poca diferencia entre los resultados de la media y los valores característicos, rangos de 22.97-24.96 y 22.09-23.58 respectivamente. Se han encontrado valores de COV bajos, con rangos de 0.05-0.08.

En los ensayos edométricos realizados en esta investigación se observó que la mayoría de las deformaciones se encontraba en el rango elástico. Con una recuperación elevada, la relación entre  $C_c$  y  $C_s$  es del rango entre 1-3, muy por debajo de lo que se presenta en las arcillas, con rangos entre 4-10. Los módulos elásticos del conjunto de las muestras son sensiblemente inferiores a los valores obtenidos para los suelos convencionales. A una presión de confinamiento de 100 kPa, el módulo de elasticidad presenta valores entre 279.02-1097.75 kPa, confirmando que se encuentra en el rango del 10% del valor propio de la arena.

De los ensayos de permeabilidad, se observa que los valores de  $S_4$  (2,0 – 7,0) y  $S_5$  (90% 2,0 – 7,0 + 10% 0,6 – 2,0) resultan similares. Se estima que la mejora de distribución de la muestra  $S_6$  (50% 2,0 – 7,0 + 50% 0,6 – 2,0) y  $S_7$  (33% 2,0-7,0+ 33% 0,6-2,0 + 33% 0,0-0,8) aumenta la permeabilidad debido al acomodo de las partículas, permitiendo un mejor drenaje. Se obtuvieron valores de coeficientes medios de permeabilidad entre de 6.85-11 ( $10^{-4}$  m/s). Este aumento se considera despreciable para el conjunto de los datos evaluados.

Se observó un comportamiento no lineal en la caracterización, al no mostrarse una relación clara entre el tamaño de la partícula y los parámetros geotécnicos. Se vislumbra que el rango de tamaños de partícula (0.8-7.0 mm) y sus posibles combinaciones, generan un modelo de comportamiento similar. Es también destacable que las combinaciones de  $S_5$ ,  $S_6$  y  $S_7$  presentan ligeramente un mejor comportamiento que el resto de las muestras evaluadas.

De los factores de equivalencia se puede concluir que los resultados muestran valores muy similares entre la bibliografía y esta investigación. Se observan valores de cohesión superiores y valores de ángulo de rozamiento ligeramente inferiores que la bibliografía estudiada. Para la validación de los datos se observan diferencias mínimas al comparar los resultados de las partículas inferiores a 12 mm con el conjunto de datos de partículas TDA (12-300 mm).

Se descarta que la variación del tamaño del granulado de NFU's pueda tener un efecto en su comportamiento, con las diferentes combinaciones llevadas a cabo en esta investigación. En rangos cortos de comparación, los resultados presentan valores similares, con rangos de diferencia  $\pm 10\%$ .

En relación a la comparativa con suelos convencionales establecidos en el DB-SE-C (2019), en cuanto a los parámetros geotécnicos, se encontró que el conjunto de las muestras evaluadas presenta valores inferiores, muy similares a los que se obtienen de los suelos arcillosos o con limos, con rangos inferiores a  $30^\circ$  para el ángulo de rozamiento.

En general, se requiere un estudio previo de los granulados de NFU's para cualquier implementación en obras de geotecnia. Por los estudios realizados, parece que la combinación de tres husos granulométricos presenta mejores comportamientos, siendo la muestra  $S_7$  (33% 2,0-7,0+ 33% 0,6-2,0 + 33% 0,0-0,8) la que mejor comportamiento exhibió en el conjunto de las muestras evaluadas.

En base a los ensayos de laboratorio para obtener los parámetros geotécnicos, se recomienda para la caracterización un estudio de entre 6 y 12 muestras para cada una

de las combinaciones a estudiar. Estas consideraciones estarán definidas de acuerdo a la escala, la importancia y el carácter de la obra.

### 10.2.3. Consideraciones sobre las aplicaciones recomendadas

Esta experimentación solo contempla los apartados correspondientes a las propiedades principales que deben cumplir los NFU's para su implementación. Los criterios de aceptación o rechazo en base a cálculos se encuentran en fase de desarrollo por parte de D<sup>a</sup> María Anguita García, dentro del proyecto de investigación "Utilización de neumáticos triturados fuera de uso (NFU) en obras de geotecnia".

Desde un punto de vista general, el conjunto de las muestras evaluadas no superan las especificaciones para altas prestaciones. Se decidió estudiar casos prácticos donde las prestaciones sean moderadas y las características propias del material puedan ser de utilidad para su implementación.

Se observa que tan solo el 6% del residuo se destina a aplicaciones del ámbito de ingeniería civil en el periodo del 2005- 2020. En este sentido, la presente investigación muestra el uso de los granulados de NFU's en aplicaciones con mayor repercusión de volumen utilizado.

En la literatura se plantea que las aplicaciones que tienen mayor repercusión son las de rellenos, debido a las grandes cantidades de material que se requieren. Por otro lado se visualizan las obras viales, especialmente los terraplenes de carreteras, donde la repercusión es mayor, ya que la ejecución de cualquier obra lineal requiere en muchos casos el empleo de gran cantidad de material. Se busca encontrar la relación entre las características que guarda el granulado de NFU's y su correcta aplicación.

Desde otro enfoque, se esboza que la aplicaciones propuestas minimizarán el uso de los áridos convencionales, tales como arena y gravas, en capas de terraplenes o como relleno de trasdosado de muros de contención, reduciendo e incluso eliminando así el impacto ambiental de la extracción de áridos pétreos.

En materia de análisis de propiedades técnicas que guardan los granulados de NFU's para sus diferentes aplicaciones, la granulometría del NFU's tiene gran influencia en las características y en el comportamiento en su implementación. Es importante destacar que se ha evaluado la franja granulométrica que no contiene acero embebido en el caucho, evitando así los posibles problemas de oxidación. Se considera que todas las muestras tienen una distribución granulométrica uniforme, lo que significa que las partículas tienen casi el mismo tamaño.

En relación a las pruebas de compactación en laboratorio con los fragmentos de NFU's, se demostró que la diferencia en relación a la energía de compactación en los resultados es despreciable, confirmando así que tiene poca influencia en las densidades máximas obtenidas. Esta información debe considerarse en la elección del equipo de compactación. En la mayoría de las investigaciones se encontró que la maquinaria más adecuada para realizar la compactación de NFU's es el rodillo liso vibratorio.

Considerando una densidad compactada de los suelos convencionales entre 14-21 kN/m<sup>3</sup> y los resultados obtenidos de las muestras ensayadas en conjunto con la bibliografía, en un rango de 5.27- 6.10 kN/m<sup>3</sup>, se afirma que el peso de los NFU's es inferior a la mitad del peso unitario de los suelos. Teniendo en cuenta los hallazgos anteriores, se puede ver que es posible una reducción en el peso (de hasta un 68%) cuando se adopta el granulado de NFU's como un reemplazo total en el diseño de la subestructura. Un beneficio adicional de reducir el peso de las mezclas de suelo con el material de relleno, es que podría resultar en una reducción del asentamiento debido a la menor presión de sobrecarga.

En las propiedades hidráulicas de los NFU's evaluadas en esta investigación, se encontraron coeficientes medios de permeabilidad entre de 6.85-11x10<sup>-4</sup> m/s. De acuerdo con el CTE-DB SE-C: 2019, las mezclas presentan resultados de coeficientes de permeabilidad característicos de suelos con drenaje adecuado para la implementación en obras de ingeniería.

De los resultados del análisis de material filtrante de las muestras de granulado de NFU's con respecto a algunos tipos de suelos como material de relleno, se observa que el



conjunto de las muestras satisface los requisitos de un buen material filtrante, permitiendo el flujo adecuado del agua hacia la tubería de drenaje cuando se trate de un relleno de arenas arcillosas (SC). A juzgar por los resultados, las muestras  $S_2$  hasta la  $S_6$  se podrían utilizar en rellenos tipo; Arenas limosas (SM), gravas limosas (GM), gravas limo arcillosas con arenas (GC-GM). La muestra  $S_1$  se contempla como una buena opción para rellenos con arcillas (CL; CH), debido a la buena relación granulométrica que mantiene el material filtrante con el relleno. Para otro tipo de material de relleno es recomendable realizar un análisis a detalle para su correcto funcionamiento, que permita un drenaje adecuado.

Los análisis de compresibilidad de los NFU's indican que el módulo de elasticidad es del orden de 2 a 3 veces menor que el módulo del suelo granular. En esta investigación se confirman dichos resultados: para una presión de confinamiento de 100 kPa, el módulo de elasticidad presenta valores entre 279-1098 kPa. Por lo tanto, se confirma que los granulados de NFU's requieren una precarga o presión de confinamiento, para evitar o minimizar las posibles deflexiones.

### *10.3. Futuras líneas de investigación*

#### 10.3.1. Continuidad de la fase experimental en puesta en obra del material

En la siguiente fase de la experimentación se contempla la generación de modelos informáticos que permitan analizar los resultados obtenidos desde la caracterización del material. Se implementa el programa PLAXIS y los resultados se comparan con los cálculos obtenidos por el método manual. El software empleado considera los modelos de deformación plana y simetría axial. Además, permite usar diferentes modelos de comportamiento del suelo, como el elástico lineal Mohr Coulomb (endurecimiento del suelo blanco) y los modelos de deslizamiento, como ya se realizó en otros estudios similares.

Los criterios de aceptación o rechazo en base a cálculos se encuentran en fase de desarrollo por parte de D<sup>a</sup> María Anguita García, dentro del proyecto de investigación "Utilización de neumáticos triturados fuera de uso (NFU) en obras de geotecnia".

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. S. Borsani, "MATERIALES ECOLOGICOS: estrategias, alcance y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles," *Arquit. Y sostenibilidad Herramientas Disen. y Tec. contro Medioambient.*, p. 30, 2011.
- [2] L. M. Casado Alejos, "Estudio de viabilidad económica del negocio de reciclaje de residuos de construcción y demolición en la Comunidad de Madrid y diseño de planta de reciclaje," 2010.
- [3] R. S. S. F. M. Salinas, *Propiedades de los materiales y elementos de construcción*, 1ª ed., 1ª. 2010.
- [4] E. Valera, *Evaluación de la sostenibilidad ambiental de hormigones con áridos reciclados procedente de residuos de construcción y demolición*. 2012.
- [5] R. A. S. de Ciencias, "MONOGRAFÍA- Geotecnia y Medio Ambiente - vol 3," Sevilla, 2012.
- [6] EUROPEAN AGGREGATES ASSOCIATION, "EUROPEAN AGGREGATES ASSOCIATION A Sustainable Industry for a Sustainable Europe," *Anual Rev.*, vol. 01, p. 32.
- [7] European Statistical System - Eurostat, "Domestic material consumption per capita. Last update: 05/03/2021," 2019. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020\\_rl110/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020_rl110/default/table?lang=en). [Accessed: 20-May-2021].
- [8] ANEFA, "El sector de los áridos en 2019 y perspectivas 2020 - ANEFA." [Online]. Available: <https://www.aridos.org/el-sector-de-los-aridos-en-2019-y-perspectivas-2020/>. [Accessed: 30-Aug-2021].
- [9] Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos., "Vegas y col," p. 60, 2017.
- [10] M. Artaraz, "Teoría de las tres dimensiones de desarrollo sostenible," *Ecosistemas*,

vol. X, no. 3, pp. 1–6, 2001.

- [11] M. Concepción and P. Menor, "Materiales sostenibles. Refugo de corcho como árido ligero en piezas de hormigón para fábrica de albañilería," 2015.
- [12] J. Kitzes *et al.*, "A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts," *Ecol. Econ.*, vol. 68, no. 7, pp. 1991–2007, May 2009.
- [13] C. Muñoz and F. Quiroz, "Using Analysis of Life Cycle tool in determining the embodied energy and carbon footprint in the manufacturing processes of the ready-mixed concrete Case manufacturing plant Bío Bío region study-Chile," *Rev. Hábitat Sustentable*, vol. 4, no. Lci, pp. 16–25, 2014.
- [14] A. B. N. A. Ambiente, D E Medio, *Guía de construcción sostenible*, vol. 001, no. M-51636–2005. 2005.
- [15] M. P. Mercader, M. Marrero, J. Solís, V. Montes, and A. Ramírez, "Cuantificación de los recursos materiales consumidos en la ejecución de la cimentación Quantification of material resources consumed during concrete slab construction," vol. 62, no. 517, pp. 125–132, 2010.
- [16] M. del C. Miñan Arenas, "Materiales sostenibles en la edificación, residuos de construcción y demolición, hormigón reciclado," 2012.
- [17] T. Asignaturas, J. Basilio, C. Tfg, and D. Marta, "NUEVA TÉCNICA DE DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES RECICLADOS: MÉTODO DEL VOLUMEN DE MORTERO EQUIVALENTE," 2012.
- [18] COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS, "Medio ambiente 2010: el futuro está en nuestras manos' - VI Programa de medio ambiente," Bruselas, 2001.
- [19] Unión Europea, "Marco sobre clima y energía para 2030 | Acción por el Clima." [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es). [Accessed: 30-Aug-2021].
- [20] H. Singh and Y. Singh, "Applications of Recycled and Waste Materials in

- Infrastructure Projects," *Lect. Notes Civ. Eng.*, vol. 21 LNCE, pp. 569–585, Nov. 2018.
- [21] V. W. Y. Tam, M. Soomro, and A. C. J. Evangelista, "A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 172, pp. 272–292, May 2018.
- [22] P. Söderholm, "Taxing virgin natural resources: Lessons from aggregates taxation in Europe," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, no. 11, Elsevier, pp. 911–922, 01-Sep-2011.
- [23] J. H. Stock and J. T. Bradt, "Analysis of proposed 20-year mineral leasing withdrawal in Superior National Forest," *Ecol. Econ.*, vol. 174, p. 106663, Aug. 2020.
- [24] F. Agrela, F. González-Gallardo, J. Rosales, J. Tavira, J. Ayuso, and M. Cabrera, "Complete real-scale application of recycled aggregates in a port loading platform in Huelva, Spain," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 11, p. 2651, Jun. 2020.
- [25] Unión Europea, "En el punto de mira: la eficiencia energética de los edificios | Comisión Europea." [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17\\_es](https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17_es). [Accessed: 30-Aug-2021].
- [26] A. A. De EDUARDO GONZÁLEZ ARIAS, Cea and C. M. Borrell, *NUEVO MÉTODO DE DOSIFICACIÓN SOSTENIBLE PARA HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS*, Universita. Barcelona, 2012.
- [27] N. Geographic, "Un tratado internacional para regular la contaminación por plástico cobra impulso." [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2021/06/tratado-internacional-para-regular-contaminacion-plastico-cobra-impulso>. [Accessed: 14-Sep-2021].
- [28] L. ÁLVAR MARTÍN GONZÁLEZ, Vicente and G. Ballester, "Aplicación del caucho reciclado como solución constructiva ecológica," valencia, 2015.
- [29] 3 de Enero de 2006 Boletín Oficial del Estado, *Real Decreto 1619/2005, de 30 de*

*diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso. 2006, pp. 352–357.*

- [30] A. Y. M. A. MINISTERIO DE AGRICULTURA, "PLAN ESTATAL MARCO DE GESTIÓN DE RESIDUOS (PEMAR) 2016-2022."
- [31] "Neumaticos, reciclado, en Waste magazine." [Online]. Available: <https://waste.ideal.es/neumaticos.htm?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>. [Accessed: 17-Apr-2020].
- [32] European Statistical System - Eurostat, "End-of-life vehicles: reuse, recycling and recovery. Last update: 08/02/2021," 2019. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env\\_waselvt/default/bar?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_waselvt/default/bar?lang=en). [Accessed: 16-Mar-2021].
- [33] AENOR, *UNE-EN 932-2 (1999) Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio*. 1999, p. 18.
- [34] U. Ts, *UNE-CEN/TS 17188: 2019 Materiales obtenidos a partir de neumáticos al final de su vida útil (NFVU) Método de muestreo para granulados y polvos almacenados en sacas / Materials obtained from end of life tyres (ELT). Sampling method for granulates and powde*. 2019.
- [35] L. Téllez, L. Villareal, C. Armenta, R. Ponsen, and M. Bremer, "Situación de la Edificación Sostenible en América Latina," *Programa las Nac. Unidas para el Medio Ambient.*, pp. 1–119, 2014.
- [36] BOE, "REAL DECRETO 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición," pp. 1–2.
- [37] Parlamento Europeo, *Catálogo Europeo de Residuos CER, aprobado por la Decisión 2000/532/CE*. 2001, p. 24.
- [38] CEDEX, *catálogo de residuos utilizables en construcción*. 2011.
- [39] C. Thomas, J. Setién, J. A. Polanco, P. Alaejos, and M. Sánchez de Juan, "Durability

- of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 1054–1065, Mar. 2013.
- [40] M. Bustillo Revuelta, *MANUAL DE RCD Y ÁRIDOS RECICLADOS*. MADRID, 2010.
- [41] D. E. Obras, *GUÍA de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) de Andalucía Central*. 2015.
- [42] S. P. D. G. A. Ihobe, *Monografía sobre residuos de construcción y demolición*. 2004.
- [43] Asociación Española de Empresas de Reciclaje de RCD (GERD), "GUÍA ESPAÑOLA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)," 2013.
- [44] M. Sánchez De Juan and P. Alaejos Gutiérrez, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, pp. 872–877, 2008.
- [45] R. De Construcción *et al.*, "FICHA TÉCNICA CEDEX - RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN," 2014.
- [46] M. Pilar Alaejos, M. Sánchez de Juan, and V. Luis Geraldés, "PANORAMA NACIONAL E INTERNACIONAL SOBRE RESIDUOS UTILIZABLES EN EDIFICACIÓN Y OBRA PÚBLICA."
- [47] I. Vegas, I. Azkarate, a Juarrero, and M. Frías, "Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados prodedentes de escombros de hormigón.," *Des. Perform. Mason. mortars made with Recycl. Concr. aggregates.*, vol. 59, no. 295, pp. 5–18, 2009.
- [48] Anna Sidorova, "Estudio del efecto de la naturaleza del árido reciclado en la microestructura y propiedades de la zona de transición árido-pasta de cemento.," pp. 1–171, 2013.
- [49] T. García, A. Juan, Polanco, M. Jesús, and S. Marquínez, "HORMIGÓN RECICLADO DE APLICACIÓN ESTRUCTURAL: DURABILIDAD EN AMBIENTE MARINO Y

COMPORTAMIENTO A FATIGA CAPITULO 2, MATERIALES Y MÉTODOS DE ENSAYO," UNIVERSIDA., DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL TERRENO Y DE LOS MATERIALES, Ed. SANTANDER, ESPAÑA, 2012.

- [50] A. E. Pavón, M. Etxeberria, and I. Martínez, "Propiedades del hormigón de árido reciclado fabricado con adiciones, activa e inerte," 2011.
- [51] L. F. J. and E. I. Moreno, "Durability Indicators in High Absorption Recycled Aggregate Concrete," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2015, 2015.
- [52] M. Sánchez De Juan, "UTILIZACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS EN HORMIGÓN NO ESTRUCTURAL: REQUISITOS EXIGIBLES," 2012.
- [53] M. Del Río Merino *et al.*, "LOS NUEVOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN COMO ALTERNATIVA AL RECICLAJE DE LOS RESIDUOS INDUSTRIALES: MORTERO DE CEMENTO-CAUCHO RECICLADO (CCR)."
- [54] P. Gonçalves and J. d. Brito, "Recycled aggregate concrete (RAC) – comparative analysis of existing specifications," *Mag. Concr. Res.*, vol. 62, no. 5, pp. 339–346, May 2010.
- [55] M. D. F. SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA, *EHE-08 INSTRUCCIÓN DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL*. 2010.
- [56] T. García, A. Juan, Polanco, M. Jesús, and S. Marquínez, "HORMIGÓN RECICLADO DE APLICACIÓN ESTRUCTURAL, CAPITULO 2, ANALISIS Y MAATERIALES," 2012.
- [57] JULIE ANNE CHAUVEINC, "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DEL MÉTODO DE MEZCLADO DEL HORMIGÓN," *Tesis.Uchile.Cl*, pp. 1–139, 2013.
- [58] Barbudo M., "Aplicaciones De Los Áridos Reciclados Procedentes De Residuos De Construcción Y Demolición En La Construcción De Infraestructuras Viarias.," p. 54, 2012.



- [59] B. González-Fontebo, F. Martínez-Abella, J. Eiras-López, and S. Seara-Paz, "Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete," *Mater. Struct.*, 2011.
- [60] L. F. Casado, "MEJORAS TECNOLÓGICAS EN EL RECICLADO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)," 2012.
- [61] L. Fueyo, D. G. Gómez Limón, and A. Rodríguez-Avello, "Separación hidráulica mediante equipos de aceleración diferencial aplicada al sector de los residuos de construcción y demolición (RCD)," *Bol. Geol. y Min.*, vol. 123, no. 2, pp. 173–182, 2012.
- [62] D. M. C. Montenegro, "Viabilidad de aplicación de materiales reciclados y cenizas de biomasa en la fabricación de materiales tratados con cemento," 2016.
- [63] V. W. Y. Tam, "Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 7, pp. 688–702, 2009.
- [64] M. Safiuddin, U. J. Alengaram, M. M. Rahman, M. A. Salam, and M. Z. Jumaat, "Use of recycled concrete aggregate in concrete: a review," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 19, no. 6, pp. 796–810, 2013.
- [65] A. E. D. R. D. R. D. C. Y. Demolición, "Informe de Producción y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición ( RCD ) en España Periodo 2011-2015," 2017.
- [66] J. S. Yadav and S. K. Tiwari, "The impact of end-of-life tires on the mechanical properties of fine-grained soil: A Review," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 21, no. 2, pp. 485–568, Apr. 2019.
- [67] P. Grammelis, N. Margaritis, P. Dallas, D. Rakopoulos, and G. Mavrias, "A Review on Management of End of Life Tires (ELTs) and Alternative Uses of Textile Fibers," *Energies*, vol. 14, no. 3, p. 571, Jan. 2021.
- [68] L. Aguado Alonso and D. Mariano González Cortina, "RECICLADO DE

NEUMÁTICOS PARA LA FABRICACIÓN DE LÁMINAS IMPERMEABILIZANTES EN LA CONSTRUCCIÓN," UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID. MASTER EN TECNICAS Y SISTEMAS DE EDIFICACION., MADRID, 2010.

- [69] K. Andreina and G. Pernía, "ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MORTEROS CON ADICIONES PROVENIENTES DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFUs) TRABAJO FIN DE MÁSTER," 2011.
- [70] European Tyre and Rubber manufacturers' Association ETRMA, "End-of-life Tyre Report 2015," 2015.
- [71] P. M. Strenk, J. Wartman, D. G. Grubb, D. N. Humphrey, and M. F. Natale, "Variability and Scale-Dependency of Tire-Derived Aggregate," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 3, pp. 233–241, Mar. 2007.
- [72] M. Arroyo, I. San Martin, S. Olivella, and M. W. Saaltink, "Evaluation of self-combustion risk in tire derived aggregate fills," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 9–10, pp. 2133–2141, 2011.
- [73] G. Cerminara and R. Cossu, "Waste Input to Landfills," in *Solid Waste Landfilling*, Elsevier, 2018, pp. 15–39.
- [74] silvia bruno de la cruz, "DISEÑO , CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UNA EN HORMIGONES Y MORTEROS," INGENIERO DE MATERIALES Curso Académico 2003-2004 Proyecto Fin de Carrera, 2004.
- [75] E. Cano, S. Lidia, and C. García, "Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso," 2007.
- [76] A. Y. M. A. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, "ACOPIOS DE NEUMÁTICOS AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL: PREVENCIÓN DE RIESGOS, GESTIÓN DE RESIDUOS Y RESTAURACIÓN," MADRID, 2017.
- [77] A. S. Gaspar, C. M. Navarro, E. F. Arauzo, and A. F. Palop, "Guía de gestión de acopios de neumáticos al final de su vida útil: prevención de riesgos, gestión de

residuos y restauración," MADRID, 2017.

- [78] İ. B. Topçu and A. Unverdi, "Scrap tires/crumb rubber," in *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications*, Elsevier, 2018, pp. 51–77.
- [79] V. Cecich, L. Gonzales, A. Hoisaeter, J. Williams, and K. Reddy, "Use of Shredded tires as Lightweight Backfill material for Retaining Structures," *Waste Manag. Res.*, vol. 14, no. 5, pp. 433–451, Oct. 1996.
- [80] T. Edeskär, "Use of Tyre Shreds in Civil Engineering Applications Technical and Environmental Properties," Luleå University of Technology, 2006.
- [81] Carlos Hidalgo Signes, "APLICACIÓN AL ESTUDIO DE LA RESPUESTA MECÁNICA DE LA CAPA DE SUBBALASTO DE VÍAS FERROVIARIAS FORMADO POR UNA MEZCLA NO BITUMINOSA DE MATERIAL GRANULAR Y PARTÍCULAS PROCEDENTES DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO," PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL Y URBANISMO, Valencia, 2017.
- [82] H. Cetin, M. Fener, and O. Gunaydin, "Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material," p. 11, 2006.
- [83] SIGNUS, "Memoria 2020 GESTIÓN Y VALORACIÓN DE LOS NFU'S," 2020.
- [84] ASTM, *D 6270 Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications*, no. Reapproved. 2004.
- [85] "AN EVALUATION OF THE POSSIBLE HEALTH RISKS OF RECYCLED RUBBER GRANULES USED AS INFILL IN SYNTHETIC TURF SPORTS FIELDS Substance Names: Substances in recycled rubber granules used as infill material in synthetic turf EC Number: Not relevant CAS Number: Not relevant Submitter: ECHA Version number: 1.01," 2017.
- [86] M. Z. Canto, "INVESTIGACIÓN CON FIBRA RECICLADA DE NEUMÁTICO (F.R.N.) APLICACIONES ACÚSTICAS," valencia, 2016.

- [87] "Economía circular - ETRMA." [Online]. Available: <https://www.etrma.org/key-topics/circular-economy/>. [Accessed: 11-Feb-2020].
- [88] "SIGNUS ADAPTA LA ESTRUCTURA DE SUS TARIFAS 2020 - SIGNUS." [Online]. Available: <https://www.signus.es/signus-adapta-la-estructura-tarifas-2020/>. [Accessed: 20-Apr-2020].
- [89] MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, "REAL DECRETO 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso."
- [90] T. D. S. Carballo, D. A. Maya, D. J. M. Domínguez, and D. V. Píriz, "Plan De Negocio Planta De Reciclado De Neumáticos Fuera De Uso," p. 135, 2007.
- [91] I. San, M. Valdor, M. Arroyo Álvarez De Toledo, and A. L. Morancho, "TROCEADOS PARA SU RECICLADO EN OBRA CIVIL. CARACTERIZACIÓN DE NEUMATICOS FUERA DE USO," Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.
- [92] F. A. López, A. López-delgado, F. J. Alguacil, and J. Manso, "SITUACIÓN ACTUAL DEL TRATAMIENTO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO Y POSIBILIDADES DE OBTENCIÓN DE NEGRO DE HUMO DE ALTA PUREZA," madrid, 2016.
- [93] A. Juan Carlos Estrada Rivera, "TESIS DE MASTER Máster MASTER EN INGENIERIA ESTRUCTURAL Y DE LA CONSTRUCCION Título ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DEL HORMIGÓN CON CAUCHO," Barcelona, 2016.
- [94] ASTM, *D 6270 Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications 1*, no. Reapproved. 2004.
- [95] N. Espa, *UNE-EN 14243-1:2019 Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil Parte 1: Definiciones generales relativas a los métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas*. 2019.
- [96] ASTM International, *ASTM D6270 - 17 Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications*. Pensilvania, 2017.

- [97] A. Española, *UNE-CEN/TS 17045:2020 Materiales obtenidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Criterios de calidad para la selección de neumáticos enteros, para los procesos de valorización y reciclaje*. 2020.
- [98] M. DE Fomento Ministerio De Medio Ambiente Centro De Estudios Y Experimentación De Obras Públicas Hormigón Residual Árido Procedente Del Reciclado Balsa De Decantación, "MANUAL DE EMPLEO DE CAUCHO DE NFU EN MEZCLAS BITUMINOSAS," 2007.
- [99] CEDEX, "Utilización de materiales marginales en terraplenes en el Sur de España y Norte de Marruecos, y metodologías para su aplicación.," Madrid, 2013.
- [100] S. Valls, "Estudio del efecto del tamaño de grano y del tratamiento superficial mecánico del polvo de neumáticos fuera de uso (PNFU) en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de base cemento (morteros).," 2014.
- [101] C. E. Pierce and M. C. Blackwell, "Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill," *Waste Manag.*, vol. 23, no. 3, pp. 197–208, 2003.
- [102] C. E. M. Sc. Thesis by Behzat Alp ATAPEK, *DETERMINATION OF PROPERTIES OF COMPOSITE SOIL WITH USED TIRE GRANULATES, SAND AND CEMENT*, no. October. 2008.
- [103] T. Zhang, G. Cai, and W. Duan, "Strength and microstructure characteristics of the recycled rubber tire-sand mixtures as lightweight backfill," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 25, no. 4, pp. 3872–3883, Feb. 2018.
- [104] J. Rodríguez-Abad R., Estaire, "Geotechnical and environmental properties of tire-used shreds for use in civil construction," *6th Int. Congr. Environ. Geotech. Delhi*, no. November 2010, p. pp pp. 986-991, 2010.
- [105] M. Abbas *et al.*, "Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 155, p. 104679, Apr. 2020.

- [106] M. DE FOMENTO, M. D. M. AMBIENTE, and CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DEL OBRAS PÚBLICAS, "FICHA TÉCNICA NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)," 2013.
- [107] A. Edinçliler, G. Baykal, and K. Dengili, "Determination of static and dynamic behavior of recycled materials for highways," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 42, no. 3, pp. 223–237, Oct. 2004.
- [108] F. H. A. u. s. D. of Transportation, "Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction - FHWA-RD-97-148," 2016. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/st4.cfm>. [Accessed: 16-Feb-2021].
- [109] C. Hidalgo Signes, J. Garzón-Roca, P. Martínez Fernández, M. E. Garrido De La Torre, and R. I. Franco, "SWELLING POTENTIAL REDUCTION OF SPANISH ARGILLACEOUS MARLSTONE FACIES TAP SOIL THROUGH THE ADDITION OF CRUMB RUBBER PARTICLES FROM SCRAP TYRES."
- [110] J. Mumtaz, I. Rashid, and J. Israr, "Laboratory modelling of strength and deformation characteristics of a high swelling soil treated with industrial wastes," *Arab. J. Geosci.* 2020 1316, vol. 13, no. 16, pp. 1–12, Aug. 2020.
- [111] S. Akbulut, S. Arasan, and E. Kalkan, "Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers," *Appl. Clay Sci.*, vol. 38, no. 1–2, pp. 23–32, Dec. 2007.
- [112] C. Hidalgo Signes, P. Martínez Fernández, J. Garzón-Roca, M. Elvira Garrido de la Torre, and R. Insa Franco, "An Evaluation of the Resilient Modulus and Permanent Deformation of Unbound Mixtures of Granular Materials and Rubber Particles from Scrap Tyres to be Used in Subballast Layers," 2016.
- [113] M. Sharma, A. S. Trivedi, and R. Sahu, "A Review on Various Methods of Road Construction Using Waste Materials," *Int. J. Civ. Eng. Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 125–133, 2016.
- [114] E. Y. Parlamento Europeo El Consejo De La Unión Europea, *DIRECTIVA 2000/53/CE*

*DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 18 de septiembre de 2000 relativa a los vehículos al final de su vida útil. 2000.*

- [115] Saint-Gobain, "Guía Técnica ARLITA en proyectos de infraestructuras y Geotecnia. Características, diseño y puesta en obra," Madrid.
- [116] AENOR, *UNE-EN 15732:2014 Materiales ligeros de relleno y productos aislantes térmicos para aplicaciones en ingeniería civil, Productos a base de áridos ligeros de arcilla expandida.* 2014.
- [117] J. M. Dávila Martín, "LA UTILIZACIÓN DE POLIESTIRENO EXPANDIDO EN OBRAS DE GEOTECNIA," Universidad de Sevilla, Sevilla, 2013.
- [118] N. E. En and N. Une-en, *UNE-EN 1997-1- Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico Parte 1: Reglas generales.* 2016, p. 196.
- [119] J. E. Gepp, F. P. de Santayana Carrillo, and Á. P. Martínez, "Bases del Anejo Nacional Español del Eurocódigo EC-7 (proyecto geotécnico)," *Hormigón y Acero*, vol. 65, no. 271, pp. 47–62, Jan. 2014.
- [120] A. J. Bond, S. Bernd, G. Scarpelli, and T. L. L. Orr, *Eurocode 7: Geotechnical Design Worked examples*, vol. 87, no. June. 2013.
- [121] D. de Carreteras, C. de Publicaciones, and M. de Fomento, "Guía para el proyecto de cimentaciones en obras de carretera con Eurocódigo 7: Bases del proyecto geotécnico," 2019.
- [122] T. López-Lara, J. Bosco Hernández-Zaragoza, J. Horta-Range, A. Coronado-Márquez, and V. M. Castaño-Meneses, "Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas," *Rev. Iberoam. Polímeros*, vol. 11, no. 3, pp. 159–168, 2010.
- [123] C. G. A. C. Y. B. RIVEROS, "REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL USO DE POLÍMEROS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS," 2015.
- [124] MDC, "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y

Puentes (PG-3)- 3RA EXPLANACIONES," 2002.

- [125] MINISTERIO DE FOMENTO, "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) Parte 4 a Drenaje."
- [126] H. Hazarika, K. Yasuhara, Y. Kikuchi, A. K. Karmokar, and Y. Mitarai, "Multifaceted potentials of tire-derived three dimensional geosynthetics in geotechnical applications and their evaluation," *Geotext. Geomembranes*, vol. 28, no. 3, pp. 303–315, Jun. 2010.
- [127] J. J. Tweedie, D. N. Humphrey, and T. C. Sandford, "Tire Chips as lightweight backfill for retaining walls - Phase II," Maine, Orono, 1998.
- [128] J. C. Lopera Perez, C. Y. Kwok, and K. Senetakis, "Effect of rubber size on the behaviour of sand-rubber mixtures: A numerical investigation," *Comput. Geotech.*, vol. 80, pp. 199–214, Dec. 2016.
- [129] D. N. Humphrey, "Civil Engineering Application of Tire Shreds," p. 16, Mar. 1999.
- [130] european tyre and rubber manufacturers association, "End-of-life Tyre REPORT 2015," 2015.
- [131] J. Álvaro Linares Martínez, A. Belén, L. García, and P. Lupiañez Cruz, "DISEÑO Y GESTIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE NEUMÁTICOS USADOS," UNIVERSIDAD DE JAÉN Escuela Politécnica Superior de Linares, Jaén, 2019.
- [132] A. Abdelrazek, R. M. El-Sherbiny, and H. A. Lotfi, "Mechanical properties and time-dependent behaviour of sand-granulated rubber mixtures," 2018.
- [133] P. Anbazhagan, D. R. Manohar, and D. Rohit, "Influence of size of granulated rubber and tyre chips on the shear strength characteristics of sand-rubber mix," *Geomech. Geoengin. AN Int. J.*, vol. 12, NO. 4, no. 1748-6025 (Print) 1748-6033 (Online), pp. 266–278, 2017.
- [134] G. A. Pistolas, · A Anastasiadis, and · K Pitilakis, "Dynamic behaviour of granular soil materials mixed with granulated rubber: influence of rubber content and mean



- grain size ratio on shear modulus and damping ratio for a wide strain range," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 3, p. 47, 2018.
- [135] N. Alvarez, J. Gutierrez, G. Duran, and L. Pacheco, "Experimental study of the mechanical effect of a clayey soil by adding rubber powder for geotechnical applications," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 758, no. 1, p. 012057, Feb. 2020.
- [136] R. Siddique and T. R. Naik, "Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview," *Waste Manag.*, vol. 24, no. 6, pp. 563–569, Jan. 2004.
- [137] S. P. Renan Sorato; Ray and B. Venkateswarlu, *Recycled aggregate concrete; an overview*, vol. 18, no. 2. 2016.
- [138] D. Pedro, J. de Brito, and R. Veiga, "Mortars Made with Fine Granulate from Shredded Tires," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 519–529, Apr. 2013.
- [139] H. A. T. OSPINA, "Valoración De Propiedades Mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho," 2014.
- [140] Sócrates Muñoz; José Vidaurre; James Asenjo; Roberth Gavidia, "USE OF RUBBER IN TIRES CRUSHED AND APPLIED TO CONCRETE: A LITERARY REVIEW," pp. 1–16, 2021.
- [141] MIGUEL DEL SOL SÁNCHEZ Para, "DESARROLLO DE ELEMENTOS ELÁSTICOS A PARTIR DE CAPAS DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO PARA SU APLICACIÓN EN VÍAS DE FERROCARRIL," UNIVERSIDAD DE GRANADA E.T.S., 2014.
- [142] C. Kraśkiewicz, B. Chmielewska, A. Zbiciak, and A. Al Sabouni-Zawadzka, "Study on Possible Application of Rubber Granulate from the Recycled Tires as an Elastic Cover of Prototype Rail Dampers, with a Focus on Their Operational Durability," *Mater. 2021, Vol. 14, Page 5711*, vol. 14, no. 19, p. 5711, Sep. 2021.
- [143] H. Moo-Young, K. Sellasie, D. Zeroka, and G. Sabnis, "Physical and Chemical Properties of Recycled Tire Shreds for Use in Construction," *J. Environ. Eng.*, vol. 129, no. 10, pp. 921–929, Oct. 2003.

- [144] N. N. Eldin, "Development of engineering criteria for shredded or whole tires in highway applications," Wisconsin Madison, 1990.
- [145] M. Anvari and I. Shooshpasha, "Fine-grained sand reinforced with granulated tire," *Int. J. Recent Innov. Trends Comput. Commun.*, vol. 2, no. 9, pp. 2879–2882, 2014.
- [146] M. A. Meguid and T. A. Youssef, "Experimental investigation of the earth pressure distribution on buried pipes backfilled with tire-derived aggregate," *Transp. Geotech.*, vol. 14, pp. 117–125, 2018.
- [147] J. H. Lee, R. Salgado, A. Bernal, and C. W. Lovell, "Shredded Tires and Rubber-Sand as Lightweight Backfill," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 125, no. 2, pp. 132–141, Feb. 1999.
- [148] J. Pfretzschner and R. M<sup>a</sup>. Rodriguez, "004\_Acoustic properties of rubber crumbs," *Polym. Test.*, vol. 18, no. 2, pp. 81–92, Apr. 1999.
- [149] UNE-EN ISO 17892-4:2019, "Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 4: determinación de la distribución granulométrica," *Une*, pp. 1–31, 2019.
- [150] N. Espa, *UNE-EN 14243-2: 2019 Materiales producidos a partir de neumáticos al final de su vida útil. Parte 2: Granulado y polvo Métodos para la determinación de sus dimensiones e impurezas, incluyendo contenido de acero libre y textil libre.* 2019.
- [151] R. D. Huamán Casas and K. W. Muguerza Zevallos, "Influencia del caucho granulado en suelos cohesivos relacionado a la propiedad de la resistencia a la penetración (CBR)," Universidad César Vallejo, 2019.
- [152] FELIPE PIZARRO VALENZUELA, *VALORIZACIÓN DE CAUCHO PROVENIENTE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO.* SANTIAGO DE CHILE, 2013.
- [153] A. Tasalloti, G. Chiaro, A. Murali, and L. Banasiak, "Physical and mechanical properties of granulated rubber mixed with granular soils—a literature review," *Sustain.*, vol. 13, no. 8, p. 4309, Apr. 2021.

- [154] UNE-EN ISO 17892-12:2019, "Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 12: determinación del límite líquido y del límite plástico," *Une*, pp. 1–27, 2019.
- [155] F. Antonio and M. Otero, "ANÁLISIS DE UNA MEZCLA SUELO-CEMENTO SUSTITUYENDO LA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA (PASA No 8 – RETIENE No 16) POR GRANO DE CAUCHO," 2015.
- [156] chester I.Duncan Jr., *Soils and Foundations for Architects and Engineers*. 1992.
- [157] AENOR, *UNE-EN 1097-6: 2014 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*. 2014.
- [158] M. Concepción and P. Menor, "Materiales Sostenibles. Refugo de Corcho como Árido Ligero en Piezas de Hormigón Para Fábrica de Albañilería," Jan. 2016.
- [159] E. Contreras-Marín, M. Anguita-García, E. M. Alonso-Guzmán, A. Jaramillo-Morilla, E. J. Mascort-Albea, and R. Romero-Hernández, "Mechanical properties of scrap tyre derived-aggregates: standard and modified proctor tests," in *REHABEND 2020 on Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*, Granada, España: Universidad de Granada, 2020, pp. 1523–1534.
- [160] D. Kyser and N. Ravichandran, "Properties of chipped rubber roofing membrane and sand mixtures for civil engineering applications," *J. Build. Eng.*, vol. 7, pp. 103–113, Sep. 2016.
- [161] AENOR, *UNE-EN ISO 17892-3:2018 Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 3: determinación de la densidad de las partículas*. 2018, pp. 1–22.
- [162] AENOR, *UNE-EN 13055-2:2005 Áridos ligeros. Parte 2: Áridos ligeros para mezclas bituminosas, trata-mientos superficiales y aplicaciones en capas tratadas y no tratadas*. 2005.

- [163] E. Tonnizam and A. Marto, "Effects of Relative Density on Shear Strength Characteristics of Sand-Tire Chips Mixture," vol. 18, 2013.
- [164] J. S. McCartney *et al.*, "Shearing Behavior of Tire-Derived Aggregate with Large Particle Size. II: Cyclic Simple Shear," 2017.
- [165] D. Kyser and N. Ravichandran, "Properties of chipped rubber roofing membrane and sand mixtures for civil engineering applications," *J. Build. Eng.*, vol. 7, pp. 103–113, Sep. 2016.
- [166] N. Oikonomou and S. Mavridou, "The use of waste tyre rubber in civil engineering works," *Sustain. Constr. Mater.*, pp. 213–238, 2009.
- [167] E. Contreras Marín, M. Anguita García, E. M. Alonso Guzmán, A. Jaramillo-Morilla, E. J. Mascort-Albea, and R. Romero-Hernández, "Mechanical properties of scrap tyre derived-aggregates: standard and modified proctor tests," 2020.
- [168] AENOR, *UNE-EN 13286-2 Métodos de ensayo para la determinación en laboratorio de la densidad de referencia y el contenido o en agua. Compactación Proctor*. 2011.
- [169] M. Kowalska, "Compactness of Scrap Tyre Rubber Aggregates in Standard Proctor Test," *Procedia Eng.*, vol. 161, pp. 975–979, Jan. 2016.
- [170] A. Tasalloti, G. Chiaro, A. Murali, L. Banasiak, A. Palermo, and G. Granello, "Recycling of End-of-Life Tires (ELTs) for Sustainable Geotechnical Applications: A New Zealand Perspective.," *Appl. Sci. 2021, Vol. 11, Page 7824*, vol. 11, no. 17, p. 7824, Aug. 2021.
- [171] I. Ahmed and C. W. Lovell, "Rubber soils as lightweight geomaterials.," *Transportation Res. Rec.*, no. 1422, pp. 61–70, 1993.
- [172] S. B. Reddy, A. M. Krishna, and K. R. Reddy, "Sustainable Utilization of Scrap Tire Derived Geomaterials for Geotechnical Applications," *Indian Geotech. J.*, vol. 48, 2018.
- [173] V. Cecich, L. Gonzales, A. Hoisaeter, J. Williams, and K. Reddy, "USE OF SHREDDED

- TIRES AS LIGHTWEIGHT BACKFILL MATERIAL FOR RETAINING STRUCTURES," *Waste Manag. Res.*, vol. 14, no. 5, pp. 433–451, Oct. 1996.
- [174] S. Li and D. Li, "Mechanical Properties of Scrap Tire Crumbs-Clayey Soil Mixtures Determined by Laboratory Tests," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2018, pp. 1–10, 2018.
- [175] T. B. Edil, "MECHANICAL PROPERTIES AND MASS BEHAVIOR OF SHREDDED TIRE-SOIL MIXTURES," *1. Edil. T. B. Mech. Prop. MASS Behav. Shredd. TIRE-SOIL Mix. 17–32 (2002).*, pp. 17–32, 2002.
- [176] AENOR, "UNE-EN ISO 17892-10:2019 Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 10: ensayos de corte directo," *Une*, pp. 1–23, 2019.
- [177] Z. H. Li and H. Y. Zhang, "Compression Properties of Granulated Rubber-Loess Mixtures as a Fill Materials," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 71–78, pp. 673–676, Jul. 2011.
- [178] J. S. Yadav and S. K. Tiwari, "The impact of end-of-life tires on the mechanical properties of fine-grained soil: A Review," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 21, no. 2. Springer Netherlands, pp. 485–568, 15-Apr-2019.
- [179] E. Masad, R. Taha, C. Ho, and T. I. Papagiannakis, "Engineering Properties of Tire/Soil Mixtures as a Lightweight Fill Material," *Geotech. Test. Journal, GTJODJ*, vol. 19, no. 3, pp. 297–304, 1996.
- [180] AENOR, *UNE-EN ISO 17892-5:2019 Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 5: Ensayo edométrico de carga incremental.* 2019, pp. 1–38.
- [181] M. B.r., A. Boominathan, and S. Banerjee, "Engineering properties of sand–rubber tire shred mixtures," *Int. J. Geotech. Eng.*, pp. 1–17, May 2019.
- [182] D. V. Okur and S. U. Umu, "Dynamic properties of clean sand modified with granulated rubber," *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2018, 2018.
- [183] R. Jamshidi *et al.*, "An Experimental and Numerical Investigation into the

- Compressibility and Settlement of Sand Mixed with TDA," *Geotech Geol Eng*, vol. 35, pp. 2401–2420, 2017.
- [184] R. K. Jain, "A Study on Eco Friendly use of Recycled Rubber Tyres," *Direct Res. J. Eng. Inf. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 23–37, 2013.
- [185] I. Ahmed, "Laboratory Study on Properties of Rubber-Soils," 1993.
- [186] UNE-EN ISO 17892-11:2020, "Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 11: ensayos de permeabilidad," *Une*, pp. 1–31, 2020.
- [187] D. Humphrey and M. Blumenthal, "The use of tire-derived aggregate in road construction applications," *Green Streets Highw. 2010 An Interact. Conf. State Art How to Achieve Sustain. Outcomes - Proc. Green Streets Highw. 2010 Conf.*, vol. 389, pp. 299–313, 2010.
- [188] N. N. Eldin, "Development of engineering criteria for shredded or whole tires in highway applications," p. 77, 1990.
- [189] Ministerio de Fomento, *CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN DB-SE-C*. 2019.
- [190] A. F. Cabalar, "Direct Shear Tests on Waste Tires–Sand Mixtures," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 29, no. 4, pp. 411–418, Jul. 2011.
- [191] S. M. Anvari, I. Shooshpasha, and S. S. Kutanaei, "Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 9, no. 5, pp. 936–944, Oct. 2017.
- [192] M. Tajabadi, M. Dehghani, S. Foroughi, and A. Salajeghe, "Applicability of Deep Soil Mixing for Use in Embankments and Foundation Support," *undefined*, vol. 5, no. 1, pp. 27–41, Mar. 2017.
- [193] H. Cano, J. Estaire, and R. Rodríguez, "Terraplén Experimental Construido," no. September, 2017.
- [194] MINISTERIO DE FOMENTO, *PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES*

*PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3) PARTE 3 EXPLANACIONES. .*

- [195] S. Yoon, M. Prezzi, N. Z. Siddiki, and B. Kim, "Construction of a test embankment using a sand-tire shred mixture as fill material," *Waste Manag.*, vol. 26, no. 9, pp. 1033–1044, Jan. 2006.
- [196] Utrera Digital, "Granulados de neumáticos para restaurar la muralla del castillo de Utrera - Utrera Digital." [Online]. Available: <https://www.utreradigital.com/web/2019/10/24/granulados-de-neumaticos-para-restaurar-la-muralla-del-castillo-de-utrera/?fbclid=IwAR2QajGdu-Rl5f0eG1mxlYUGHQ-Fh7UvglXDaJGR4FmKFodhK1-zTxdvH2Q>. [Accessed: 26-Nov-2021].
- [197] Patricia Bernal Rodríguez, "Castillo de Utrera: Restitución del lienzo sureste.," Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [198] INGEOSUR, "ESTUDIO GEOTECNICO EN VIVIENDA UNIFAMILIAR C/ NUFRO SÁNCHEZ, 24. SEVILLA," 2018.
- [199] INGEOSUR, "EDIFICACIÓN EN PLANTA BAJA POL. 12, PARCELA 101. CHICLANA DE LA FRONTERA (CÁDIZ)," 2019.
- [200] INGEOSUR, "REHABILITACIÓN DE VIVIENDA UNIFAMILIAR AV. SAN ISIDORO DEL CAMPO, 27. SANTIPONCE (SEVILLA)," 2018.
- [201] GEOTEMA, "ESTUDIO GEOTÉCNICO C/ VELAZQUEZ N°6 SEVILLA (SEVILLA)."
- [202] Labson, "Estudio geotécnico, Vivienda en c/ Marques Luca de Tena Sevilla."
- [203] Labson, "Estudio Geotécnico, Edificio de Viviendas y Garaje c/ Juan Rabadán y Castillo Sevilla," 2008.
- [204] Vorsevi, "Estudio Geotécnico, Rehabilitación del Mercado 'puerta de la carne' Sevilla."
- [205] Elabora, "Estudio Geotécnico Edificio de 15 Viviendas y Garajes Carretera de

Carmona Sevilla," 2017.

- [206] INECO, "ANEJO N° 7. ESTUDIO GEOTÉCNICO DEL CORREDOR."
- [207] La Sociedad Española de Mecánica de Rocas (SEMR), "LA MECÁNICA DE ROCAS EN EL EUROCÓDIGO 7 Y OTRAS NORMATIVAS." p. 77, 2015.
- [208] C. Hidalgo-Signes, J. Garzón-Roca, J. M. Grima-Palop, and R. Insa-Franco, "Use of rubber shreds to enhance attenuation of railway sub-ballast layers made of unbound aggregates," *Mater. Constr.*, vol. 67, no. 326, Apr. 2017.
- [209] F. H. A. u. s. D. of Transportation, "Scrap Tires - User Guideline - Embankment or Fill - User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction - FHWA-RD-97-148," 2016. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/st4.cfm>. [Accessed: 16-Feb-2021].
- [210] R. Jamshidi *et al.*, "An Experimental and Numerical Investigation into the Compressibility and Settlement of Sand Mixed with TDA Drained constraint modulus H Height of model K 0 "At-rest" coefficient of lateral earth pressure L Width of model," *Geotech Geol Eng*, vol. 35, pp. 2401–2420, 2017.
- [211] A. Tasalloti, G. Chiaro, A. Murali, and L. Banasiak, "Physical and mechanical properties of granulated rubber mixed with granular soils—a literature review," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 8. MDPI AG, p. 4309, 02-Apr-2021.
- [212] W. Y. Wu, C. C. Benda, and R. F. Cauley, "Triaxial Determination of Shear Strength of Tire Chips," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 123, no. 5, 1997.
- [213] B. E. Tuncer, "Mechanical properties and mass behavior of shredded tire-soil mixtures," *Int. Work. Light. Geo-Materials*, pp. 17–32, 2002.



## ANEXOS

### ***Plan de difusión de resultados de investigación***

A continuación se enlista la difusión que se ha dado desde el ingreso al programa de doctorado:

#### **1\_Publicación en revista Q2 de JCR:**

Publicación de artículo en revista ubicada en el Q2 de JCR. La doctoranda, aparece como primer autor y publica junto a sus tutores de tesis un artículo en el que se ilustra parte de los resultados del análisis experimental realizado en el laboratorio, así como cálculos de factores de seguridad para la implementación en rellenos de trasdós de muros de contención.

Revista Applied Sciences (ISSN: 2076-3417), factor de impacto 2.679, JCR category rank: Q2: Engineering.

- Título: *"Use of Granulated Rubber Tyre Waste as Lightweight Backfill Material for Retaining Walls"*.
- Autores: Elizabeth Contreras-Marín, María Anguita-García, Elia Mercedes Alonso-Guzmán, Antonio Jaramillo-Morilla, Emilio J. Mascort-Albea, Rocío Romero-Hernández and Cristina Soriano-Cuesta.

Appl. Sci. 2021, 11(13), 6159; Received: 25 May 2021 / Revised: 24 June 2021 /

Accepted: 28 June 2021 / Published: 2 July 2021.

Ver en: <https://doi.org/10.3390/app11136159>

#### **2\_ Comunicaciones de impacto internacional y nacional:**

Uno de los puntos novedosos de la investigación radica en el uso de una metodología innovadora para el análisis de resultados de la caracterización de granulados de NFU's. De dichas investigaciones se pueden consultar las siguientes publicaciones indexadas:

- *"Mechanical properties of scrap tyre derived-aggregates: standard and modified proctor tests"*. **Autores:** Contreras Marín, E., Anguita García, M., Alonso Guzmán, E.M., Jaramillo-

Morilla, A., Mascort-Albea, E.J. y Romero-Hernández, R. (2020). En Rehabend 2020 on Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management (8th Rehabend Congress), Granada.

Ver en: <https://idus.us.es/handle/11441/102759>

\_ *"Caracterización de agregados reciclados en Michoacán México"*. **Autores:** Maybelín Carolina García Chiquito, Elizabeth Contreras Marín, Wilfrido Martínez Molina, Elia Mercedes Alonso Guzmán Hugo Luis, Chávez García. Área: General. Tipo: Comunicación Oral. Participación en el Primer Congreso Internacional de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) INTERNATIONAL CONGRESS OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE RECYCLING (C&D WASTE). Sede: instituto Eduardo Torroja, CSIC. Madrid 30 y 31 de Octubre de 2019.

Ver en: <https://www.congresorcd.es/uploads/app/532/elements/file/file1572457222.pdf>

-*"DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE OXINA EN AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO (ARC)"*. **Autores:** Elizabeth Contreras Marín, Wilfrido Martínez Molina, Elia Mercedes Alonso Guzmán, Antonio Jaramillo Morilla. Área: General. Tipo: Comunicación póster. Participación en el Primer Congreso Internacional de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) INTERNATIONAL CONGRESS OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE RECYCLING (C&D WASTE). Sede: instituto Eduardo Torroja, CSIC. Madrid 30 y 31 de Octubre de 2019.

Ver en: <https://www.congresorcd.es/uploads/app/532/elements/file/file1572457222.pdf>

\_ *"MECHANICAL PROPERTIES OF SCRAP TYRE: THE DIRECT SHEAR TEST"*. Autores: Elizabeth Contreras Marín, Wilfrido Martínez Molina, Elia Mercedes Alonso Guzmán, Antonio Jaramillo Morilla, et al. En el XXVIII INTERNATIONAL MATERIALS RESEARCH CONGRESS, Cancún, México, Agosto 2019.

\_ *"EVALUATION OF GOVERNMENTAL ACTIONS IN THE EUROPEAN UNION: THE RCD'S CASE STUDY IN BUILDING"*. Autores: Elizabeth Contreras Marín, Elia Mercedes Alonso

Guzmán, Antonio Jaramillo Morilla et al. En el XXVII INTERNATIONAL MATERIALS RESEARCH CONGRESS, Cancún, México, Agosto 2018.

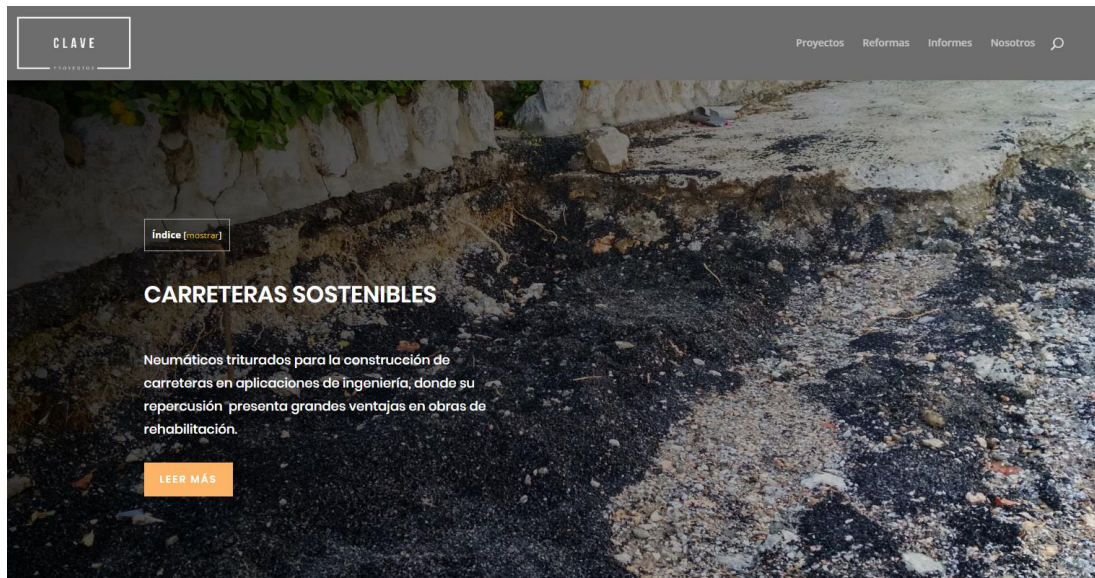
\_"Caracterización geométrica de áridos reciclados de la zona Morelia, Michoacán, México",

**Autores:** Elizabeth Contreras\*, Ramón A. Figueroa, Arturo Zalapa, Wilfrido Molina, Cindy Lara, Elia M. Alonso, incluida dentro "VII CONGRESO NACIONAL DE ALCONPAT", celebrado el 06 de Noviembre de 2016 en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca (México).

### 3\_ DIFUSION EN PÁGINAS WEB:

#### BLOG de Clave proyectos

Ver en: <https://claveproyectos.es/carreteras-sostenibles/>



## **\_Boletín informativo de SIGNUS (Sistema colectivo de Gestión de Neumáticos Fuera de Uso) Julio 2019. Valorización Restauración del castillo de Utrera con neumáticos**

Ver en: [https://www.signus.es/wp-content/uploads/2019/07/Revista-ecovalor20\\_03.pdf](https://www.signus.es/wp-content/uploads/2019/07/Revista-ecovalor20_03.pdf)

### » valorización

## Restauración del **Castillo de Utrera** con neumáticos

Por Clara Navío

Encontrar nuevas aplicaciones para los subproductos resultantes del tratamiento y reciclado de los neumáticos fuera de uso puede comenzar por donde menos se espera. Por ejemplo, en una tesis doctoral. O en dos.

Como las que están realizando Elizabeth Contreras, ingeniera civil mexicana, y María Anguita, arquitecta de Sevilla, dirigidas ambas por el catedrático de Ingeniería del Terreno, Antonio Jaramillo, de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla.

"Las dos investigan sobre el uso de materiales procedentes de reciclaje en arquitectura. En principio querían hacer sus tesis con hormigones, pero en España no se han hecho apenas demoliciones recientemente; además de que no es tan frecuente aquí como en México, donde sí es más normal que demuelan edificios y vuelvan a utilizar otra vez los hormigones como áridos".

Antonio Jaramillo tiene el encargo de la restauración de una parte del castillo de Utrera, Sevilla. Una fortaleza construida sobre los restos de una antigua torre árabe y de la que las primeras noticias de su existencia datan de 1264. Destruído en el siglo XIV, fue reconstruido a finales del mismo. Actualmente el ayuntamiento de Utrera trabaja para convertirlo en un valor turístico y cultural de la localidad. Y fue "a través de un amigo, que se dedica a los neumáticos, un taller de venta y cambio de me comentó si sería un posible usar los residuos de neumáticos. Él fue quien me puso en contacto con SIGNUS y a través de ellos contacté con la empresa aquí en Sevilla que se dedica a la fabricación de granulados de neumáticos".

Hasta aquí la pequeña historia, digamos humana, de cómo se ha incorporado granulados de NFU en dos obras dirigidas por este arquitecto. La del castillo y la de la urbanización Los Cármes del Mar, en Granada.



## ANEJOS

### VALORES CARACTERÍSTICOS DE LOS GRANULADOS DE NFU'S

Tabla 42. Valores característicos de la base de datos bibliográfico de los de NFU's.

MUESTRA	Granulado <12 mm			TDA (12 -300 mm)		
	pd (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	φ (°)	pd (kN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	φ (°)
1	5.9	0.0	27.0	5.14	9.6	22.00
2	5.89	0.0	32.00	5.14	9.6	22.00
3	4.20	7.0	10.5	5.14	9.6	22.00
4	4.70	0.0	54.00	6.70	3.9	15.00
5	5.75	0.00	47.00	6.95	3.7	32.00
6	5.75	10.00	27.00	7.10	3.7	27.00
7	6.00	17.00	29.00	7.00	3.5	29.00
8	6.15	7.04	40.70	9.00	3.0	30.00
9	7.15	0.00	41.70	5.53	11.5	19.00
10	5.80	5.70	27.00	6.90	7.7	21.00
11	5.68	8.10	32.00	7.30	8.6	25.00
12	4.00	19.00	42.00	7.01	3.1	22.00
13	7.00		45.00	6.82	8.6	25.00
14	9.00		44.00	7.24	11.5	19.00
15	5.40		50.00	5.69	7.7	21.00
16			21.60	4.95	4.3	16.00
17				5.89	0.0	30.00
18				5.69	0.0	54.00
19				6.50	10.0	27.00
20				8.20	10.0	28.50
21				4.30	7.0	29.60
22				5.20	7.0	29.60
23				5.80	11.0	23.10
24				5.39	9.6	26.50
25				7.01	15.0	38.50
26				6.52	7.0	22.00
27				5.15	10.0	54.00
28				5.80	24.5	57.00
29				5.75	29.00	26.50
30				5.50	82.00	34.00
31				12.97		29.00
32				5.90		14.35
33						8.75
34						33.00
35						30.00
<i>n° datos</i>	15.00	12.00	16.00	32.00	30.00	35.00
VALOR MAXIMO	9.00	19.00	54.00	9.00	29.00	57.00
VALOR MINIMO	4.00	0.00	10.50	4.30	0.00	8.75
MEDIA	5.89	6.15	34.50	7.01	8.61	27.50
MEDIANA	5.80	6.35	32.00	5.90	8.60	26.50
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1.22	6.69	12.30	4.67	6.19	10.77
COEFF. DE VARIANZA%	19.96	104.09	34.58	65.66	70.72	38.56
COV	0.21	1.09	0.36	0.67	0.72	0.39
(tn-1)	1.76	1.80	1.75	1.70	1.70	1.69
Klow	1.82	1.87	1.81	1.72	1.73	1.71
Kmean	0.45	0.52	0.44	0.30	0.31	0.29
Val.low	3.68	-6.35	12.28	-1.04	-2.09	9.03
Val.mean	5.34	2.69	29.11	5.60	6.69	24.42

Tabla 43. Valores característicos del ensayo Próctor de Densidad seca máxima  $\rho_d$  (kN/m<sup>3</sup>) de los Granulados de NFU's.

<b>DENSIDAD SECA MÁXIMA <math>\rho_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>						
%	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
5	-	5.98	5.87	5.82	-	-
10	6.30	5.86	5.70	6.04	5.92	6.26
15	-	5.76	5.63	5.67	6.28	-
20	-	5.57	5.58	6.03	6.09	-
25	-	5.69	5.69	6.36	5.99	5.88
30	-	5.87	5.85	6.28	-	-
35	-	5.61	6.32	4.72	-	-
40	-	5.39	6.49	5.50	-	-
45	-	5.39	5.76	4.76	-	-
50	6.10	5.93	6.17	5.41	-	-
<i>n° muestras</i>	2.00	10.00	10.00	10.00	4.00	2.00
VALOR MAXIMO	6.30	5.98	6.49	6.36	6.28	6.26
VALOR MINIMO	6.10	5.39	5.58	4.72	5.92	5.88
MEDIA	6.20	6.10	6.28	6.05	6.07	6.07
MEDIANA	6.20	5.73	5.81	5.75	6.04	6.07
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.14	0.21	0.31	0.57	0.16	0.27
COEFF. DE VARIANZA%	1.61	3.31	4.72	8.99	2.23	3.13
COV	0.02	0.03	0.05	0.09	0.03	0.04
(tn-1)	6.31	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83
Klow	7.73	1.92	1.92	1.92	2.05	2.25
Kmean	4.46	0.58	0.58	0.58	0.92	1.30
Val.low	5.11	5.69	5.68	4.95	5.75	5.47
Val.mean	5.57	5.97	6.10	5.72	5.93	5.72

Elizabeth Contreras Marín  
 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS:  
 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU'S)

Tabla 44. Valores característicos del ensayo de cizallamiento directo de los granulados de NFU's: Cohesión (kPa).

<b>COHESIÓN (kPa)</b>							
MUESTRA	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
1	15.78	8.39	24.98	28.77	13.59	14.99	25.40
2	12.19	18.78	20.18	12.79	12.19	17.78	18.18
3	16.58	16.38	18.18	23.58	20.38	14.79	8.99
4	18.18	17.18	11.78	23.57	5.79	13.19	16.38
5	10.39	25.97	19.98	21.98	16.98	21.58	27.97
6	13.99	17.82	26.57	22.98	13.59	26.37	27.37
VALOR MAXIMO	18.18	25.97	26.57	28.77	20.38	26.37	27.97
VALOR MINIMO	10.39	8.39	11.78	12.79	5.79	13.19	8.99
MEDIA	14.52	17.42	19.34	22.28	13.75	18.12	20.72
MEDIANA	14.89	17.50	19.98	23.27	13.59	16.38	21.79
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	2.90	5.62	5.29	5.22	4.90	5.01	7.50
COEFF. DE VARIANZA%	18.23	29.44	24.47	21.38	32.54	25.24	33.07
COV	0.20	0.32	0.27	0.23	0.36	0.28	0.36
(tn-1)	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
Klow	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18
Kmean	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
Val.low	8.21	5.19	7.83	10.92	3.08	7.21	4.38
Val.mean	12.13	12.80	14.99	17.99	9.72	13.99	14.54

Tabla 45. Valores característicos del ensayo de cizallamiento directo de los Granulados de NFU's: Ángulo de rozamiento (°).

<b>ÁNGULO DE ROZAMIENTO (°)</b>							
MUESTRA	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
1	23.60	26.47	22.41	21.36	23.01	26.47	24.91
2	23.45	23.45	22.56	24.76	26.75	26.47	25.34
3	23.60	22.41	22.86	23.01	23.45	22.56	27.44
4	25.05	25.48	25.20	21.66	26.33	26.47	26.33
5	26.33	23.16	22.86	23.89	25.34	23.60	22.71
6	25.34	24.04	22.11	23.16	23.01	24.18	22.41
VALOR MAXIMO	26.33	26.47	25.20	24.76	26.75	26.47	27.44
VALOR MINIMO	23.45	22.41	22.11	21.36	23.01	22.56	22.41
MEDIA	24.56	24.17	23.00	22.97	24.65	24.96	24.86
MEDIANA	24.33	23.74	22.71	23.08	24.39	25.33	25.12
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1.19	1.53	1.11	1.30	1.71	1.74	1.98
COEFF. DE VARIANZA%	4.41	5.77	4.42	5.16	6.32	6.35	7.29
COV	0.05	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08
(tn-1)	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
Klow	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18
Kmean	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
Val.low	21.98	20.84	20.58	20.15	20.93	21.18	20.54
Val.mean	23.58	22.91	22.09	21.90	23.24	23.53	23.22