

University of Cantabria / University of Granada

Organizers:



REHABEND 2020

Euro-American Congress

**CONSTRUCTION
PATHOLOGY,
REHABILITATION
TECHNOLOGY AND
HERITAGE MANAGEMENT**

Granada (Spain) - March 24th-27th, 2020

Sponsor entities:



Patronato de la Alhambra y
Generalife
CONSEJERÍA DE CULTURA Y
PATRIMONIO HISTÓRICO



REHABEND 2020

**CONSTRUCTION PATHOLOGY, REHABILITATION TECHNOLOGY AND
HERITAGE MANAGEMENT**

(8th REHABEND Congress)

Granada (Spain), March 24th-27th, 2020

PERMANENT SECRETARIAT:

UNIVERSITY OF CANTABRIA

Civil Engineering School

Department of Structural and Mechanical Engineering

Building Technology R&D Group (GTED-UC)

Avenue Los Castros s/n 39005 SANTANDER (SPAIN)

Tel: +34 942 201 738 (43)

Fax: +34 942 201 747

E-mail: rehabend@unican.es

www.rehabend.unican.es

REHABEND 2020

ORGANIZED BY:



UNIVERSITY OF CANTABRIA (SPAIN)
www.unican.es // www.gted.unican.es



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

UNIVERSITY OF GRANADDA (SPAIN)
www.ugr.es

CO-ORGANIZERS ENTITIES:



CHILE-UNIVERSIDAD AUSTRAL
DE CHILE



ITALY-POLITECNICO DI BARI



MEXICO-UNIV. MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



PERU-UNIVERSIDAD NACIONAL
PEDRO RUIZ GALLO



PORTUGAL-UNIVERSIDADE
DE AVEIRO



PORTUGAL-INSTITUTO SUPERIOR
TÉCNICO | UNIV. DE LISBOA



SPAIN-TECNALIA RESEARCH &
INNOVATION



SPAIN-UNIVERSIDAD DEL
PAÍS VASCO



SPAIN-UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE CATALUÑA



SPAIN-UNIVERSIDAD DE BURGOS



SPAIN-UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE MADRID



SPAIN-UNIVERSIDAD DE SEVILLA



SPAIN-UNIVERSIDAD EUROPEA
MIGUEL DE CERVANTES



UNITED STATES OF AMERICA-
UNIVERSITY OF MIAMI



URUGUAY-UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA

CONGRESS CHAIRMEN:

IGNACIO LOMBILLO
MARIA PAZ SÁEZ

CONGRESS COORDINATORS:

HAYDEE BLANCO
YOSBEL BOFFILL

EDITORS:

IGNACIO LOMBILLO
HAYDEE BLANCO
YOSBEL BOFFILL

INTERNATIONAL SCIENTIFIC ADVISORY COMMITTEE:

HUMBERTO VARUM – UNIVERSITY OF AVEIRO (PORTUGAL)
PERE ROCA – TECHNICAL UNIVERSITY OF CATALONIA (SPAIN)
ANTONIO NANNI – UNIVERSITY OF MIAMI (USA)

The editors does not assume any responsibility for the accuracy, completeness or quality of the information provided by any article published. The information and opinion contained in the publications of are solely those of the individual authors and do not necessarily reflect those of the editors. Therefore, we exclude any claims against the author for the damage caused by use of any kind of the information provided herein, whether incorrect or incomplete.

The appearance of advertisements in this Scientific Publications (Printed Abstracts Proceedings & Digital Book of Articles - REHABEND 2020) is not a warranty, endorsement or approval of any products or services advertised or of their safety. The Editors does not claim any responsibility for any type of injury to persons or property resulting from any ideas or products referred to in the articles or advertisements.

The sole responsibility to obtain the necessary permission to reproduce any copyright material from other sources lies with the authors and the REHABEND 2020 Congress can not be held responsible for any copyright violation by the authors in their article. Any material created and published by REHABEND 2020 Congress is protected by copyright held exclusively by the referred Congress. Any reproduction or utilization of such material and texts in other electronic or printed publications is explicitly subjected to prior approval by REHABEND 2020 Congress.

ISSN: 2386-8198 (printed)

ISBN: 978-84-09-17871-1 (Printed Book of Abstracts)

ISBN: 978-84-09-17873-5 (Digital Book of Articles)

Legal deposit: SA - 132 - 2014

Printed in Spain by Círculo Rojo

161	THE EFFECTS OF TRADITIONAL HOT-LIME TECHNOLOGY ON THE CHARACTERISTICS OF LIME <i>Pesce, Cecilia; Pesce, Giovanni Luca</i>	1366
187	DAMAGES PRODUCED BY THE SEPTEMBER 19, 2017 EARTHQUAKE ON THE TEMPLE OF THE SAINT MATTHEW'S EX CONVENT IN ATLATLAHUCAN, MEXICO <i>Martínez, Guillermo; Jara, José M.; Olmos, Bertha A.</i>	1375
189	MECHANICAL CHARACTERIZATION OF MASONRY SAMPLES EXTRACTED OF MEXICAN CONVENT CHURCHES FROM SIXTEENTH CENTURY <i>Chávez, Marcos M.; Durán, Daniel; Peña, Fernando; García, Natalia</i>	1383
206	ANALYSIS AND CONSERVATION STRATEGIES OF TRADITIONAL TIMBER ROOF STRUCTURES IN NORTHERN MOROCCO <i>Dipasquale, Letizia; Galassi, Stefano; Tempesta, Giacomo; Ruggieri, Nicola</i>	1391
269	MATERIALS AND CONSTRUCTION TECHNIQUES AS A TOOL FOR THE RESTITUTION OF MEDRACENS' BUILDING PROCESS <i>Amokrane, Lamia; Kassab Baba Ahmed, Tsouria; Monjo Carrio, Juan</i>	1399
281	RELATIONSHIP OF THE PRISMA ELASTICITY MODULES OF CERAMIC BLOCKS WITH EMPLOYED MORTARS <i>Fonseca, Platão; Désir, Jean Marie</i>	1407
297	HISTORICAL MORTAR COATING CHARACTERIZATION FOR RECORDING AND RESTORATION PROPOSAL <i>Giordani, Caroline; Guerra, Fernanda L.; Socoloski, Rafaela F.; Zucchetti, Lais; Masuero, Angela B.</i>	1416
370	ACOUSTIC ANALYSIS OF ANCIENT CLAY BRICKS FROM ZAMORA (SPAIN) TO DETERMINE ITS CONTRIBUTION IN REDUCTION OF ENVIRONMENTAL NOISE <i>Antón Iglesias, María Natividad; Rodríguez-Esteban, María Ascensión; Ramos Gavilán, Ana Belén; Sáez-Pérez, María Paz; Camino-Olea, María Soledad; Muñoz-Gamazo, Sebastián Ángel</i>	1425
388	"LOST WOODEN STRUCTURE" THE CHURCH OF SANTIAGO APÓSTOL OF MANJIRÓN (MADRID) <i>Vela Cossío, Antonio; de Mingo García, Javier</i>	1433
422	ALTERNATIVE MATERIALS AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR LOW-INCOME HOUSING IN TROPICAL AFRICA <i>Margani, Giuseppe; Tardo, Carola</i>	1443
447	REINTERPRETATION OF FLAT SCULPTING OF AREQUIPA'S IGNIMBRITE CULTURAL HERITAGE <i>Bustamante, Rosa; Vázquez, Patricia; Llerena, Kelly; Prendes, Nicanor</i>	1451
502	SUSTAINABILITY AND RESOURCE CONSERVATION IN BUILDING INNOVATIONS AND THEIR IMPACT ON SERVICE LIFE EXTENSION OF CONCRETE STRUCTURES <i>Avellan, Kari Christer; Belopotocanova, Erika</i>	1459
531	THE BUILDING OF FALSE VAULTS IN THE MAYA REGION FROM THE EARLY CLASSIC TO THE LATE POSTCLASSIC PERIOD (CENTS. III TO XV D.C.); CONDITIONS OF STRUCTURAL STABILITY, BUILDING FORMS AND REGIONAL VARIATIONS <i>Engelking Keeling, Segismundo</i>	1467
571	ECOLOGICAL RESTORATION MORTARS AND PLASTERS DESIGNED WITH RAW MATERIAL FROM THE ISLAND OF GAVDOS <i>Fotiou, Afroditi; Oiry, Claire; Kapetanaki, Kali; Perdikatsis, Vassilis; Kallithrakas-Kontos, Nikolaos; Maravelaki, Noni-Pagona</i>	1482

2.3.- Novelty products applicable and new technologies.

41	PROPOSAL OF AN INNOVATIVE SOLUTION FOR VENTILATED FAÇADE: DESIGN CONSIDERATIONS AND RELEVANCE IN BUILDING-REFURBISHMENT <i>Pérez-Fenoy, José; Galán-Marín, Carmen; Rivera-Gómez, Carlos</i>	1490
49	NEW MATERIALS TO INCREASE THE THERMAL MASS OF EXISTING BUILDINGS FOR ITS ENERGY REHABILITATION <i>Bartolomé, César; Alarcón, Arturo; Tenorio, José Antonio; Bermejo, Ester</i>	1498
82	ACOUSTIC STUDIES OF CONCRETES CONTAINING INDUSTRIAL CO-PRODUCTS: NEW EXPERIMENTAL APPROACHES <i>Esteban, Alberto; Losáñez, Milagros; Santamaria, Amaia; Ortega-López, Vanesa; San José, José Tomás</i>	1507
94	DESIGN OF HEMP AGGREGATE CONCRETES FOR REHABILITATION AND RETROFIT WORKS OF VERNACULAR ARCHITECTURE. VALORISATION OF HEMP WASTE <i>Sáez-Pérez, M^a Paz; Brümmer, Monika; Durán Suárez, Jorge A; Carretero Ayuso, M.</i>	1515
109	MECHANICAL PROPERTIES OF SCRAP TYRE DERIVED AGGREGATES: STANDARD AND MODIFIED PROCTOR TESTS <i>Contreras-Marín, Elizabeth; Anguita-García, María; Alonso-Guzmán, Elia Mercedes; Jaramillo-Morilla, Antonio; Mascort-Albea, Emilio; Romero-Hernández, Rocío</i>	1523

CODE 109

MECHANICAL PROPERTIES OF SCRAP TYRE DERIVED AGGREGATES: STANDARD AND MODIFIED PROCTOR TESTS

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO: PRÓCTOR NORMAL Y MODIFICADO

Contreras-Marín, Elizabeth¹; Anguita-García, María¹; Alonso-Guzmán, Elia Mercedes²; Jaramillo-Morilla, Antonio¹; Mascort-Albea, Emilio¹; Romero-Hernández, Rocío¹

1: Grupo TEP-018 Ingeniería del Terreno, Escuela Superior de Arquitectura Universidad de Sevilla (US)
e-mail: elizabethcontrerasmarin@gmail.com, web: <https://claveproyectos.es/>

2: Cuerpo Académico Consolidado CAC-UMSNH-147, Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México

RESUMEN

Los materiales granulados producto de la trituración de los neumáticos fuera de uso (NFU's) presentan en general grandes ventajas en aplicaciones en obras de ingeniería civil, esto se debe a su bajo peso específico; elevada permeabilidad; mayor resistencia a la degradación en comparación con materiales convencionales. En todos los casos es necesario llevar a cabo actividades de compactación del material para disminuir el índice de poros y reducir los futuros asentamientos que pueda experimentar el granulado al aplicarse las cargas sobre este, debido a su recuperación elástica.

El presente trabajo presenta las propiedades mecánicas relacionadas con la densidad seca NFU's (tamaño inferior a 12mm [ASTM D 6270-17]) analizando la repercusión del tamaño de las partículas y el contenido de agua para alcanzar la humedad óptima. Las diferentes fracciones estudiadas comprenden las siguientes muestras, A: RE-G1 (0,6 – 2 mm), B: RMD – G1 (0,6 – 2 mm), C: RE –G2 (2,00 – 4,00mm), D: RMD – G2 (2,00 – 7,00 mm). Los resultados ofrecen valores de densidad seca para la muestra A: 595 kg/m³, con un 10% de humedad y para D: 648 kg/m³ con un 25% de humedad, indicándose que el contenido de agua no repercute significativamente en los valores finales.

En la siguiente campaña de ensayos se realizaron mezclas en distintas proporciones, como pueden ser B (50%) + D (50%), que resultó en una densidad seca de 654 kg/m³ y para la mezcla B (10%) + D (90%), de 600.3 kg/m³, ambas para el 10% de humedad. Con estos ensayos se manifiesta la poca variabilidad de los resultados, para los usos granulométricos trabajados.

La metodología empleada se basa en las premisas del ensayo Próctor normal (6.1 Kgcm/cm³) y Próctor Modificado (27.53 Kgcm/cm³) analizando así la influencia que la energía de compactación ejerce sobre los resultados finales. Para la energía de compactación de Próctor Modificado en el caso de la mezcla muestra B (10%) + D (90%), se obtuvieron valores de 624 kg/m³ para el 10% de humedad, mientras que para el 25% se observó un leve incremento a 647 kg/m³. Esta investigación persigue revalorizar los NFU's más allá de su mercado principal, actualmente constituido por la valorización energética.

PALABRAS CLAVES: Neumáticos Fuera de Uso (NFU's); ensayo próctor normal; recuperación elástica; energía de compactación.

1. INTRODUCCIÓN

El sector de los áridos es el principal suministrador de materias primas para la construcción de infraestructuras, edificación e industria, lo que le confiere el carácter de industria estratégica. Debido a la disponibilidad de áridos naturales, a la facilidad y al bajo coste del vertido de residuos, el reciclado de residuos industriales ha sido históricamente bajo en España y en el mundo en general. A pesar de ello, esta situación está cambiando poco a poco gracias a las políticas de gestión de residuos y también a las iniciativas privadas, que están promoviendo el reciclaje de residuos industriales por motivos ecológicos y económicos, ya que, correctamente explotado, resulta rentable como fuente de áridos para la construcción y como recuperación de otros materiales.

La nueva legislación de la Unión Europea (Directiva 2008/98/CE sobre los residuos, plan de gestión de neumáticos fuera de uso (2017–2024)) refuerza la jerarquía de residuos, exigiendo a los Estados miembros que adopten medidas específicas para dar prioridad a la prevención, la preparación para la reutilización, el reciclado y la valorización energética por delante del depósito en vertedero y la incineración, con el fin de hacer que la economía circular se convierta en una realidad[1].

En la actualidad no existe normativa técnica específica para el uso áridos industriales reciclados. Por este motivo, se les suele tratar como áridos convencionales y se utiliza la Instrucción de Hormigón Estructural [2] para el uso en hormigones y el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (conocido normalmente como PG-3) [3] para su empleo en carreteras.

De acuerdo con el PG-3, existe la clasificación de los suelos potencialmente utilizables en obras de ingeniería en base al análisis de un conjunto de propiedades. Actualmente, esta clasificación comprende cinco grupos que abarcan desde los suelos con mejores características hasta los de menores calidades, de acuerdo con el siguiente orden: suelos seleccionados, adecuados, tolerables, marginales e inadecuados. [4].

El granulado de neumáticos fuera de uso (NFU) es conocido por sus propiedades elásticas. Esto se ve reflejado al usar sus propiedades de amortiguamiento en aplicaciones como: césped artificial, losetas en parques infantiles, suelas de zapatos, etc. A continuación se enlistan algunas de las propiedades más representativas del granulado de NFU.

Tabla 1: Resumen de propiedades del granulado NFU

Parámetro	Estándar	Granulado NFU 1[5]	Granulado NFU 2 [6]	Granulado NFU 3 [6]
Coefficiente de uniformidad (Cu)	ASTM D6913 UNE-EN 933-1: 1998	-	80	1,4
Coefficiente de curvatura (Cc)	ASTM D6913 UNE-EN 933-1: 1998	-	1,4	0,9
Coefficiente de permeabilidad (K)	ASTM D7760 PF-7	$5 \cdot 10^{-4}$	$3,05 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Densidad seca (g / cm ³)	ASTM C127 UNE-EN 1097-3: 1999	-	2,77	1,14
Absorción de agua (%)	ASTM C127 UNE-EN 1097-3: 1999	3,9	0,71	5,00
Densidad seca máxima (g / cm ³)	ASTM D1557 UNE 103501: 1994	0,50	2,36	0,57
Humedad óptima (%)	ASTM D1557 UNE 103501: 1994	-	6,2	-
Los Ángeles (LA)	ASTM C131 UNE-EN 1097-2: 1999	-	25	-

En relación a las investigaciones que analizan la implementación de los granulados de NFU como sustitutos de los áridos convencionales en la elaboración de hormigones ([7]–[12]), se encuentra que debido a que las partículas de caucho presentan un comportamiento elastomérico, es decir, se deforman elásticamente mucho más que la pasta de cemento que las rodea. Cuando se carga, las fisuras se inician

rápidamente alrededor de las partículas de caucho de la mezcla, lo cual acelera la falla en la zona de transición cemento-caucho. Se hace relevante la afectación que se provoca al implementarlo en la elaboración de hormigones.

La característica de compresibilidad de los granulados se encuentra fuertemente ligada a la compacidad que poseen. Para el caso de los granulados de NFU, su elevada compresibilidad se debe a las propiedades elásticas del caucho, que es el principal componente de los neumáticos. Este hecho obliga al conocimiento detallado de la compresibilidad del granulado de NFU, para evitar asientos inesperados en las puestas en marcha.

Respecto a las variables que determinan la correspondiente compresibilidad, se estudia la densidad seca (γ_d) y la humedad (ω) de compactación. La “Tabla 2” muestra estudios referentes las propiedades de los áridos convencionales y mezclas de suelos de subalastos tradicionales con porcentajes de NFU. Las muestras se denominaron SUB_X, con los correspondientes porcentajes de sustitución.

Tabla 2: Estado del arte de diferentes suelos: densidad seca (γ_d) y la humedad (ω) de compactación [13][6]

Referencia	Tipo de suelo	Densidad seca (γ_d)	Humedad (ω)
1	Arena Gruesa	2,19 gr/cm ³	8%
2	Arena	2,00 gr/cm ³	12%
3	Arcilla Arenosa	1,84 gr/cm ³	14%
4	Arcilla Limosa	1,65 gr/cm ³	15%
5	Arcilla Plástica	0,62 gr/cm ³	18%
6	SUB_MIX2.5% NFU	2,21 gr/cm ³	6.1%
7	SUB_MIX 5.0 % NFU	2,11 gr/cm ³	6.0%
8	SUB_MIX10 % NFU	2,01 gr/cm ³	6.0%

La siguiente investigación se centra en potenciar las posibilidades de utilización del granulado de neumático fuera de uso, en adelante NFU, como árido para la construcción, y particularmente en aplicaciones donde la repercusión por metro cúbico empleado faciliten el cumplimiento de la normativa vigente sobre el almacenamiento de este residuo urbano.

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, las 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 CO2 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 PNACC (Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático), los cuales se engloban dentro del RETO DE INVESTIGACIÓN “5. Cambio climático y utilización de recursos naturales y materias primas”.

2. METODOLOGÍA

Se evalúan los efectos del cambio de variables actuantes en la compresibilidad de los granulados de NFU; variables de la energía de compactación (Proctor normal 0,583 J/cm³, Proctor modificado 2,632 J/cm³), compensaciones granulométricas, periodos de saturación. Todo esto con el objetivo de determinar la relación entre la densidad seca y la humedad y así poder definir la densidad seca máxima y su correspondiente humedad óptima. Se discute el contenido óptimo de agua en la mezcla del granulado NFU, antes de la pérdida de trabajabilidad de las muestras.

La experimentación se encuentra basada en la determinación de ramales de humedad a diferentes probetas, compactadas en las mismas condiciones para la determinación de la densidad seca, de manera que estos pares de valores, representados en coordenadas cartesianas, definen la relación óptima buscada. Se califica la compacidad por la comparación cuantitativa de las densidades secas o pesos

unitarios secos que el granulado NFU va adquiriendo gradualmente al variar la humedad, la energía o el método de compactación.

2.1. Tipo de residuo urbano


La normativa española: “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes” (en adelante PG-3) recoge, en su artículo 330 referente a terraplenes, las especificaciones relativas a la ejecución de los terraplenes y las características que deben cumplir los materiales a emplear. A continuación se enlistan ejemplos de materiales no convencionales y residuos de posible utilización en terraplenes de carreteras [4]

Tabla 3 Materiales no convencionales y residuos de posible utilización en terraplenes de carreteras [4]

CLASIFICACIÓN	TIPO DE MATERIAL
RESIDUOS URBANOS E INDUSTRIALES	-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

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 terraplenes viarios se encuentran los NFU, los cuales, ya sean de caucho sintético o natural, están compuestos principalmente por: negro de carbono, óxido de zinc, acero, material textil y otros aditivos. A continuación se señalan las características más importantes de dichos materiales:

Tabla 4 Propiedades del granulado de NFU [4]

TIPO DE MATERIAL	PROPIEDADES PRINCIPALES	FOTO
NFU	Densidad del NFU sin compactar: 150 y 535 kg/m ³ Densidad del NFU compactado: 630 y 840 kg/m ³ Alta elasticidad. Permeabilidad similar a las arenas: 5 x 10 ⁻² 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.	

2.2. Universo de muestra

Los granulados analizados se obtienen 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.

A partir del convenio de colaboración que existe entre la Universidad de Sevilla y la Empresa SIGNUS (Sistemas Integrados de Gestión de Neumáticos Usados) para la colaboración del proyecto GRENECO (Granulado reciclado para la construcción) se realizó la toma de muestras.



Figura 1: Imágenes del ensayo granulométrico

El marco de estudio se centra en el análisis de las dos plantas de tratamiento más significativas en Andalucía inscritas en el padrón de Gestores de SIGNUS. La selección de la muestra se ha realizado a partir de la producción de las plantas y en base a una recopilación de datos.

Tabla 5: Granulometría correspondiente a la producción

PLANTA RENEAN	PLANTA RMD
Material granular de 0'60 - 2'00 mm - 20 Kg	Material granular de 0'60 - 2'00 mm - 20 Kg
Material granular de 2'00 - 4'00 mm - 20 Kg	Material granular de 2'00 - 7'00 mm - 20 Kg

Considerando que el principal objetivo de este proyecto de investigación es evaluar las diferentes alternativas de uso para el aprovechamiento de este residuo, se procedió a la obtención de diferentes granulometrías acorde a la producción de las plantas de tratamiento. Fracciones de granulado reciclado, tanto la fracción gruesa como la fina, y realizando varios programas específicos de toma de muestra para el cumplimiento del artículo 330 referente a terraplenes [3], las especificaciones relativas a la ejecución de los terraplenes y las características que deben cumplir los materiales a emplear.

Tabla 6: Clasificación de las muestras a evaluar

Muestra	CLASIFICACIÓN	DENOMINACIÓN
A	RE-G1 100%	A: RE-G1 (0.6 - 2 mm)
B	RMD - G1 100%	B: RMD - G1 (0.6 - 2 mm)
C	RE -G2 100%	C: RE -G2 (2.00 - 4.00mm)
D	RMD - G2 100%	D: RMD - G2 (2.00 - 7.00 mm)
E	B (50%) + D (50%)	E: MEZCLA 1 B(50%) + D (50%)
F	B (10%) + D (90%)	F: MEZCLA 2 B (10%) + D (90%)

2.3. Elaboración del ensayo

La caracterización del material se llevó a cabo mediante una campaña de ensayos en el laboratorio de Mecánica del Suelo, en la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Sevilla (US). Los equipos se habían empleado hasta el momento para la caracterización de suelos convencionales, y no se llevaron a cabo adaptaciones de los mismos para los ensayos con granulado de neumático (NFU), considerándose en la medida de lo posible el tamaño de la partícula máximo para cada equipo, y en caso contrario comparando los resultados obtenidos entre las distintas muestras.



Figura 2: Imágenes del ensayo granulométrico

Seis mezclas de granulado NFU, con varios porcentajes de partículas, han sido evaluadas y comparadas. Se efectuaron dos tipos de ensayos: Ensayo Proctor Normal (PN) UNE 103500:1994 y Ensayo Proctor Modificado (PM) UNE 103501:1994. Se estudiaron nueve incrementos del 5% de contenido de agua introducidos con porcentajes entre el 10% y el 50% sobre el peso del granulado de NFU. En el ensayo Proctor, la energía específica E_e , está dada por:

$$E_e = \frac{n * N * W * h}{V} \quad (1)$$

Siendo:

N = # de capas

n = # de golpes

W = peso del pistón

h = altura de caída del pistón

V = volumen del molde y muestra

Se realiza un seguimiento de las especificaciones que indica la normativa utilizada: determinación del volumen, mezcla del granulado con agua (dependiendo de la proporción), compactación de: 3 capas, 26 golpes por capa (para Proctor normal) ó 5 capas de 60 golpes por capa (para Proctor Modificado); se retira el collar y se enrasa; masa del molde con granulado compactado; se extrae el granulado del molde; se parte verticalmente por el centro; se toma una cantidad no inferior a 100g; se determina la humedad según UNE-103-300; masa recipiente con tapa; masa con muestra húmeda; secado en la estufa; peso final de muestra seca; determinación de densidades a partir de la norma UNE-EN 17892-3 y humedades a partir de la norma UNE-EN ISO 17892-1; gráfica densidad/humedad; determinación de la densidad máxima y humedad óptima.



Figura 3: Imágenes del ensayo Proctor

2.4. Aplicaciones

De la necesidad de buscar nuevas aplicaciones surge la propuesta de utilizar el granulado de NFU como árido para la construcción, y particularmente en aplicaciones donde la repercusión por metro cúbico empleado facilite el cumplimiento de la normativa vigente sobre el almacenamiento de este residuo industrial. La aplicación más común de los áridos reciclados en Europa y la mayoría de los estados de Norteamérica en el ámbito de ingeniería civil es en capas de base y subbases granulares de nuevos pavimentos, con o sin aglomerante hidráulico, siendo su proceso de almacenamiento, manipulación y puesta en obra similar al de los áridos convencionales[10].

En el uso de materiales alternativos, como lo son los dichos granulados, a diferencia de cuando se emplean materiales convencionales en la construcción de caminos, se debe tomar en cuenta la interacción que éstos tendrán en el ambiente desde un punto de vista químico y físico. Algunas de las interacciones potenciales que se podrían dar son: 1) el transporte de partículas finas en el empleo del material (e.g. cenizas), 2) infiltración por lluvia (antes de cubrir el material e.g. antes de sellos en carpetas), 3) transferencias de contaminantes al subsuelo o agua subterránea por infiltración de la lluvia, antes, durante o después de los sellos o coberturas, 4) el efecto de la transferencia de contaminantes por deformaciones debido al añejamiento por condiciones climáticas, y 5) el efecto de la transferencia de contaminantes por deformaciones debidas al tránsito [14]

Tabla 7 Propiedades y observaciones de los granulados de NFU [4, pp. 47–50]

TIPO DE MATERIAL	OBSERVACIONES PARA LA PUESTA EN OBRA DE MATERIALES
NFU	<ul style="list-style-type: none"> - Las piezas de NFU sólo se pueden colocar en el núcleo - Las capas de NFU 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 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 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 no debe ser mayor de 3 m. - Las capas de NFU han de envolverse en geotextiles para evitar la percolación de partículas de suelo entre las tiras de NFU. - La distribución de tamaños y el contenido de alambres expuestos del material NFU serán los de un material Tipo B (Clase II) de la Norma ASTM D6270-08ε1. - Para una mezcla de relleno NFU-suelo con las mejores características mecánicas posibles, lo más idóneo es fabricarla al 50% en volumen de ambos materiales. - Las capas intermedias de material convencional 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, drenándola con una ligera pendiente lejos de la estructura.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Curva granulométrica

Los resultados de los ensayos de tamizado se llevan a un gráfico llamado curva granulométrica. Se evalúan las curvas granulométricas de los diferentes subproductos de las plantas de tratamiento evaluadas. Se grafican también las curvas de Fuller con el objetivo de la compensación de las muestras E: mezcla 1 B (50%) + D (50%). La Figura 1 muestra la variación de las diferentes curvas que se dibujan en escala semilogarítmica.

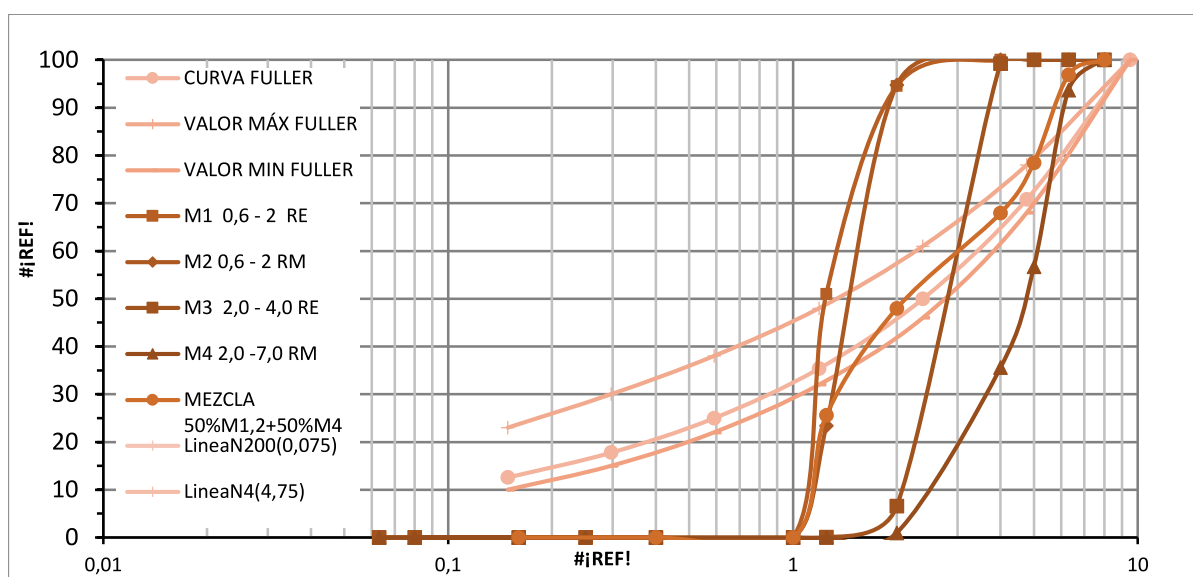


Figura 4: gráfica comparativa de granulometrías para probetas de NFU

Se observa una notable uniformidad de los resultados en el dominio de los tamizados, probablemente debido al proceso de trituración de las muestras, así como el proceso de separación del acero y textil, que repercute en el tamaño de la partícula resultante, generando una homogeneidad de las muestras.

3.2. Prueba mecánica (Compactación)

La energía de compactación (E_e) fue difícil de evaluar por la alta deformabilidad del granulado de NFU. Esto se debe a sus altos módulos de elasticidad. La compactación y la presión de apisonado depende 100% del operador. El método que se llevó a cabo en el laboratorio fue por impacto, provocando rebotes en el granulado que generaban desplazamiento de las partículas, reduciendo así su compactación.

No se visualizaron diferencias en los resultados de la densidad seca a partir del incremento de la energía de compactación. Los incrementos fueron $\leq 5\%$ en relación a la energía de Proctor normal. Los valores obtenidos se muestran en la “Tabla 8”.

Tabla 8: Comparativa de energías de compactación para probetas de NFU.

Muestra	CLASIFICACIÓN	% de Agua	Proctor	Densidades seca (γ_d) UNE-EN 17892-3 (gr/cm^3)	Humedad (ω) UNE-EN ISO 17892-1 (%)
F1	B (10%) + D (90%)	10	Normal	0,603	6,302
F3	B (10%) + D (90%)	10	Modificado	0,624	9,199
F2	B (10%) + D (90%)	25	Normal	0,621	16,218
F4	B (10%) + D (90%)	25	Modificado	0,647	16,033

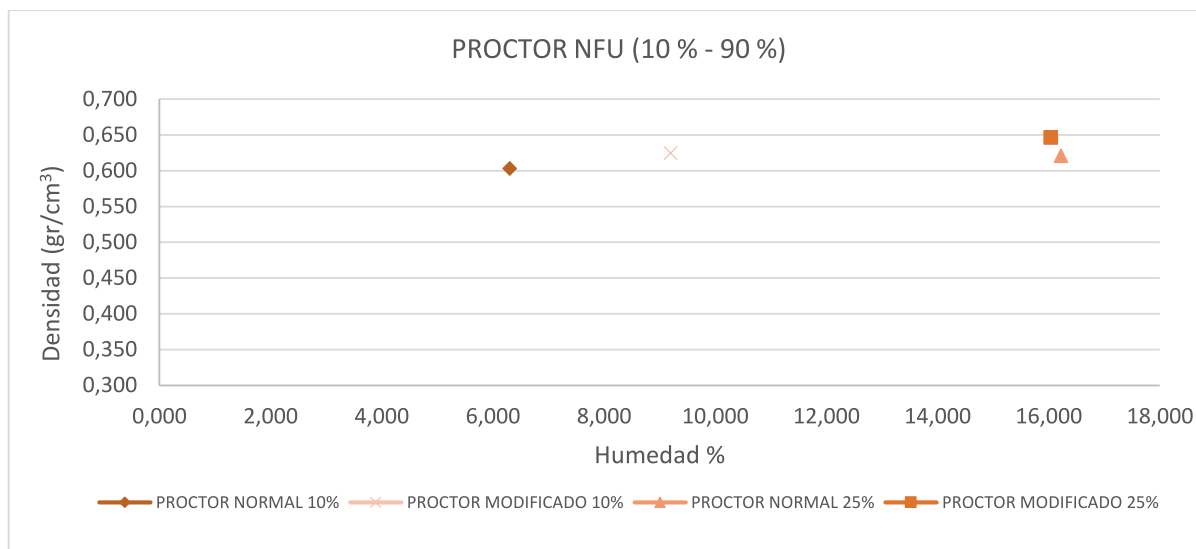


Figura 5: gráfica comparativa de energías de compactación para probetas de NFU

3.3. Humedad de las muestras

El contenido de agua en las mezclas en el caso de los granulados de NFU repercute en el acomodo de las partículas y en la interacción entre ellas, reduciendo así la fricción y aumentando la trabajabilidad. El granulado de NFU tiene valores de absorción inferiores al $\leq 5\%$, lo que indica que el agua adherida a las mezclas formaba una película en el contorno de la partícula ayudando así a su acomodo. Se observó que hasta un 20% de agua ayuda la trabajabilidad, sin embargo para valores superiores a este porcentaje el agua escurría cada vez más a medida que se realizaba el llenado por capas.



Figura 6: Imágenes de ensayos proctor con 20% de agua

3.4. Densidades máximas

La humedad óptima es la que se corresponde con el máximo de la curva de densidad. La curva de humedad – densidad o de compactación. Esta curva da la variación, γ_d Vs ω , que se obtiene en laboratorio. La densidad seca (γ_d) va variando al modificar la humedad (ω) de compactación. La humedad óptima es la que se corresponde con el máximo de la curva de densidad.

Gracias al barrido de granulometrías analizadas se pueden establecer parámetros característicos resultantes. Se observó que la adición de porcentajes de agua en las mezclas no repercute en la densidad resultante. En ninguna de las 6 mezclas de granulado de NFU se observó una clara línea de tendencia de la curva de humedad, así como tampoco en la curva de secado. Los diferentes porcentajes de partículas que han sido evaluados y comparados reflejan valores similares, estableciendo así un rango de valores de $0,550 \text{ gr/cm}^3$ como mínima hasta un $0,680 \text{ gr/cm}^3$ como máxima.

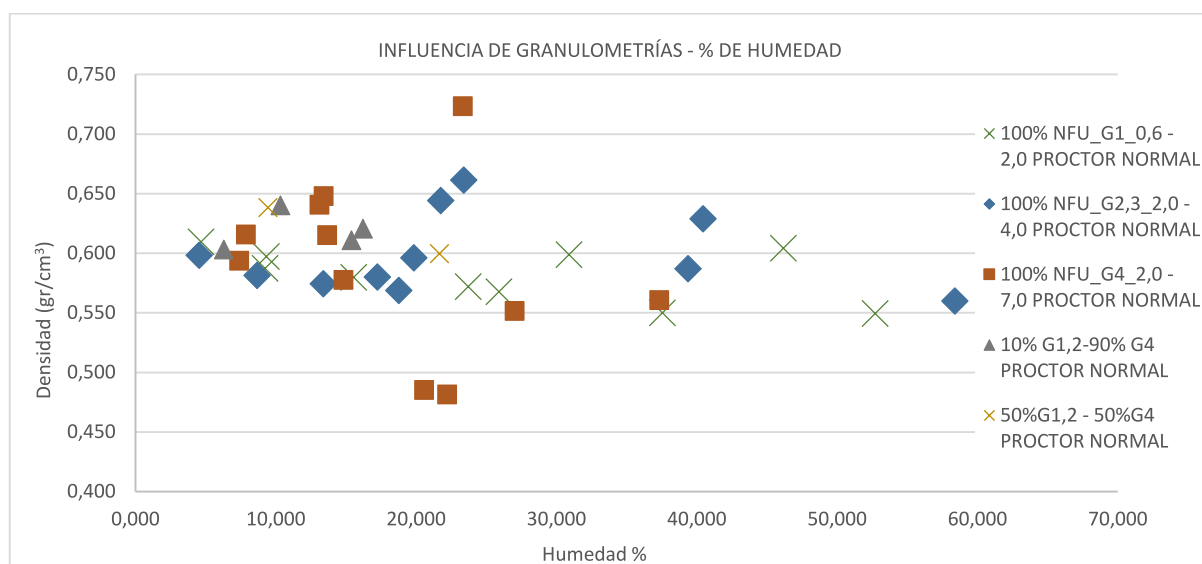


Figura 7: gráfica influencia de Granulometrías - % de Humedad para probetas de NFU

Con respecto a la comparación que se podría establecer con un árido convencional, las densidades máximas que se pueden obtener del granulado de NFU se encuentran muy por debajo de los valores obtenidos con áridos convencionales. Los valores resultantes se asemejan a las características de una arcilla plástica del orden $0,62 \text{ gr/cm}^3$ de densidad máxima para una humedad óptima de 18%.

4. CONCLUSIONES

Los resultados expuestos con anterioridad forman parte de la campaña de pruebas de la caracterización física- mecánica del granulado de NFU acorde al convenio entre la Universidad de Sevilla y la Empresa SIGNUS (sistemas integrados de gestión de neumáticos usados) para la colaboración del proyecto GRENECO (Granulado reciclado para la construcción).

Con respecto a la comparación entre empresas suministradoras, las plantas RENE A y planta RMD, no existen diferencias de resultados. Las muestras: A: RE-G1 (0.6 - 2 mm) y B: RMD - G1 (0.6 - 2 mm) fueron semejantes. Los granulados dependen principalmente de la característica de la NFU (similares en plantas) y del proceso de trituración. Por lo tanto, se concluye que el proceso de trituración no repercute en los resultados de las muestras.

Se ha concluido que la densidad máxima varía muy poco con el grado de uniformidad y tamaño máximo de las partículas, es decir, existe poca diferencia entre las 6 granulometrías evaluadas, que mientras más uniforme o menor variación en el tamaño de partícula presente el granulado y mayor tamaño de partícula presente, menor será densidad resultante.

La calidad de la compactación no se vio influenciada por el contenido de humedad, mejoró la trabajabilidad de las muestras hasta valores inferiores al 20% de contenido de agua. Para contenidos mayores no hubo influencia. En relación al gráfico densidad máxima – humedad óptima, no se encontraron bien definidas las ramas de humedad y seca, pues el granulado tardaba tiempo en admitir agua que se agregaba.

Los resultados experimentales no mostraron evidencia de mejoras en los valores de la densidades con respecto al aumento de la energía de compactación (aumento de 6.1 kg cm/cm³ a 27.53 kg cm/cm³). En las recomendaciones técnicas de puesta en marcha, es necesario tomar en cuenta estos aspectos y optar por puestas en marcha como rellenos ligeros o aprovechamiento de su amortiguamiento para capas de terraplén que absorban deformaciones inesperadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Se hace un extenso agradecimiento 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, como también al grupo de investigación TEP-018 Ingeniería del Terreno de la Universidad de Sevilla (US), por la oportunidad de participar en el proyecto GRENECO (Granulado reciclado para la construcción).

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SIGNUS, “PLAN DE GESTIÓN DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (2017 – 2024),” MADRID, 2017.
- [2] “NUEVOS HORMIGONES EN LA EHE - 08 Hormigones Especiales,” 2009.
- [3] MINISTERIO DE FOMENTO, *PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3) PARTE 3 EXPLANACIONES.* .
- [4] CEDEX, “Unión Europea FEDER; Utilización de materiales marginales en terraplenes en el Sur de España y Norte de Marruecos, y metodologías para su aplicación.,” Madrid, 2013.
- [5] 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. 986-991, 2010.
- [6] C. Hidalgo-Signes, J. Garzón-Roca, J. M. Grima-Palop, R. Insa-Franco, and R. Insa-Franco, “USE OF RUBBER SHREDS TO ENHANCE ATTENUATION OF RAILWAY SUB-BALLAST LAYERS MADE OF UNBOUND AGGREGATES,” *Mater. Construcción*, vol. 67, no. 326, p. 115, Feb. 2017.
- [7] I. San, M. Valdor, M. Arroyo Álvarez De Toledo, and A. L. Morancho, “CARACTERIZACIÓN DE NEUMATICOS FUERA DE USO TROCEADOS PARA SU RECICLADO EN OBRA CIVIL.,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.
- [8] H. A. T. OSPINA, “VALORACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETO ADICIONADO CON RESIDUOS DE LLANTAS DE CAUCHO,” pp. 1–238, 2014.
- [9] 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.
- [10] G. F. Flor Chávez, “APROVECHAMIENTO DE HORMIGÓN RECICLADO EN OBRAS VIALES,” p. 172, 2012.
- [11] I. Vegas, I. Azkarate, a Juarrero, and M. Frías, “DISEÑO Y PRESTACIONES DE MORTEROS DE ALBAÑILERÍA ELABORADOS CON ÁRIDOS RECICLADOS PRODEDENTES DE ESCOMBRO DE HORMIGÓN.,” *Des. Perform. Mason. mortars made with Recycl. Concr. aggregates.*, vol. 59, no. 295, pp. 5–18, 2009.

- [12] T. García, A. Juan, Polanco, M. Jesús, and S. Marquínez, “HORMIGÓN RECICLADO DE APLICACIÓN ESTRUCTURAL, CAPITULO 2, ANALISIS Y MAATERIALES,” 2012.
- [13] “Compactación de suelos Capítulo 14 CAPÍTULO 14 COMPACTACIÓN DE SUELOS_PROCTOR NORMAL Y MODIFICADO.”
- [14] E. Del, A. Sobre, and E. L. Uso, “DE RESIDUOS Y SUB-PRODUCTOS,” no. 394, 2014.