

## Índice

1.	Introducción	6
1.1.	Objetivos	9
1.2.	Metodología	9
2.	Marco teórico	11
2.1.	Antecedentes	11
2.1.1.	Trabajabilidad	11
2.1.2.	Propiedades mecánicas	11
2.1.3.	Comportamiento acústico	15
2.1.4.	Comportamiento térmico	15
2.1.5.	Comportamiento al fuego	17
3.	Experimental	18
3.1.	Materiales empleados	18
3.1.1.	Cemento	18
3.1.2.	Árido	18
3.1.3.	Granza de neumático	18
3.1.3.1.	Granulometría de GNEU	19
3.1.3.2.	Determinación de la densidad	20
3.1.3.3.	Análisis termogravimétrico	21
3.1.4.	Agua	22
3.1.5.	Aditivos	22
3.1.6.	Dosificación	22
3.2.	Equipos y procedimientos	23
3.2.1.	Amasado de morteros	23
3.2.1.1.	Equipos del proceso de amasado	23
3.2.1.2.	Procedimientos de amasado	24
3.2.2.	Determinación de la trabajabilidad	25
3.2.3.	Curado	26
3.2.4.	Caracterización mecánica	27
3.2.5.	Caracterización óptica	27
3.2.6.	Velocidad de ultrasonidos	28
3.2.7.	Resonancia	29
3.2.8.	Conductividad térmica	30
3.2.9.	Caracterización SEM	30
4.	Resultados y discusión	32
4.1.	Caracterización en estado fresco. Trabajabilidad	32
4.2.	Densidad aparente en seco y absorción de agua	36
4.3.	Velocidad de ultrasonidos y resonancia	38
4.4.	Resistencia mecánica	46
4.5.	Conductividad térmica	53
4.6.	Microestructura	58
5.	Conclusiones	61
6.	Propuestas de investigación	63
7.	Bibliografía	65

## 1. Introducción

La gestión de neumáticos fuera de uso (NFU) se ha convertido en un problema característico de los países industrializados. Aunque se trata de un residuo no peligroso, su eliminación de manera inadecuada o su producción en grandes cantidades puede contaminar gravemente el medioambiente:

- La disposición en vertederos no permite la recuperación de materia ni de energía.
- Sirven de refugio a ratas y aumentan la proliferación de mosquitos.
- Acumulan gases y lixiviados frecuentes en los vertederos.
- Poseen una alta capacidad calorífica, lo que dificulta su extinción en caso de incendios.
- Dificultan la rehabilitación del vertedero al ser difícilmente compactables.
- No son degradables ya que han sido diseñados para resistir condiciones mecánicas y meteorológicas duras, son resistentes al ozono, la luz y las bacterias.



Figura 1.1 Vertedero de neumáticos fuera de uso. Fuente: [www.signus.com](http://www.signus.com)

A tal efecto, surge un marco normativo [1-6] tendente a optimizar la gestión de neumáticos usados, prohibiendo disponer neumáticos en vertederos, proponiendo el reciclado y la reutilización como vías de valorización y asegurando un esquema económico para la correcta gestión de los neumáticos usados.

En España, la Ley 10/1998 de residuos [7] define el marco general para el tratamiento de los residuos generados por la sociedad. Un

zcriterio básico es el llamado principio de jerarquía contemplado en el artículo 1.1 de dicha ley:

*Artículo 1.1 Esta Ley tiene por objeto prevenir la producción de residuos, establecer el régimen jurídico de su producción y gestión y fomentar, por este orden, su reducción, su reutilización, reciclado y otras formas de valorización, así como regular los suelos contaminados, con la finalidad de proteger el medio ambiente y la salud de las personas.*

Este principio consiste en una secuencia ordenada de modalidades de gestión, de mayor a menor calidad ecológica, que se acepta como directriz general a la hora de decidir la mejor gestión para los residuos: Prevenir en la medida de lo posible, reutilizar lo que se pueda, reciclar lo que no se pueda utilizar y valorizar todo lo que no se pueda reutilizar o reciclar.

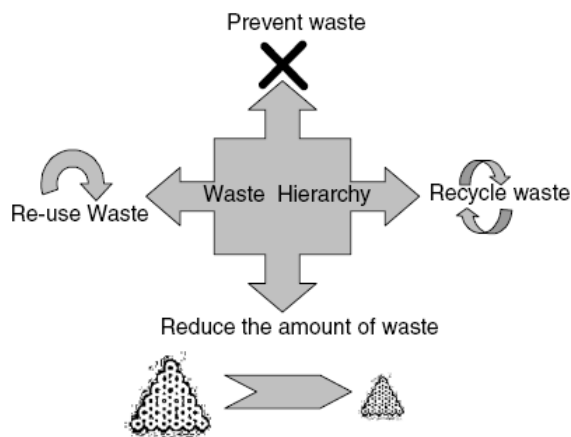


Figura 1.2. Principio de jerarquía. Fuente: Batayneh et al.[8]

En particular, el Plan nacional de neumáticos fuera de uso [9], prevé la adopción de procedimientos de reciclado y valorización ecológicos. Se pueden citar:

- Recauchutado, si los neumáticos están todavía en buen estado, pueden revestirse de una nueva superficie de rodadura.
- Valorización material: Enteros, troceados, molidos, los neumáticos pueden ser reutilizados y valorizados en diversas aplicaciones. Pueden destacarse las aplicaciones en arrecifes de los neumáticos enteros, como aislante térmico y acústico

de los neumáticos triturados, o las aplicaciones en materiales bituminosos.

- Valorización energética: El neumático tiene un poder calorífico alto (7500 Kcal/kg) que es superior al del carbón y menos contaminante que éste, ya que el neumático tiene un menor contenido de azufre, constituyendo un buen combustible, y puede ser valorizado energéticamente en centrales eléctricas, cementeras, industrias papeleras, cerámicas, de producción de vapor.

Tabla 1.1. Posibles aplicaciones para el caucho reciclado procedente de NFU

Aplicaciones ya implantadas en el mercado	Aplicaciones en fase de desarrollo	Aplicaciones potenciales
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Campos de hierba artificial.</li> <li>- Pistas de atletismo.</li> <li>- Otros pavimentos deportivos.</li> <li>- Aislantes acústicos y antivibratorios.</li> <li>- Industria del calzado.</li> <li>- Industria automovilística.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Betunes y mezclas bituminosas para pavimentos de carreteras.</li> <li>- Morteros de cemento con caucho.</li> <li>- Decoración vegetal.</li> <li>- Pavimentos para deportes hípicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construcción de taludes.</li> <li>- Arrecifes artificiales.</li> <li>- Sellado de vertederos.</li> <li>- Colchones para ganado.</li> <li>- Polímeros termoplásticos.</li> <li>- S.A.R caucho activado superficialmente</li> </ul>

\*Fuente: PNIR 2008-2015 [9]

A pesar de la amplia gama de posibilidades de empleo en España no se aprovecha todo el potencial que tienen los neumáticos fuera de uso y las cantidades consumidas en aplicaciones de reutilización son aún muy inferiores al volumen generado, teniendo en cuenta la existencia de un stock histórico.

Dentro de las posibles aplicaciones del caucho procedente de NFU se encuentran los morteros de cemento con la incorporación de estos residuos. Esta aplicación ha sido ampliamente estudiada [10-11] pero aun se encuentra a día de hoy en fase de desarrollo. Las propiedades elásticas del caucho, su resistencia al impacto y baja densidad, son a menudo características deseadas en morteros y hormigones. La utilización del caucho procedente de NFU en materiales de base cementante puede reducir la fragilidad y mejorar sus propiedades térmicas y acústicas de estos materiales, además de ser una

alternativa limpia a la disposición de este material nocivo para el medio ambiente y por encima de la valorización energética, en el anteriormente descrito principio de jerarquía.

## 1.1 Objetivos

El objetivo de este estudio es la valorización material de neumáticos fuera de uso a partir de su aplicación como granza de neumático (GNEU) en mezclas cementantes ultraligeras y estudiar sus propiedades físicas, mecánicas, acústicas y térmicas, para desarrollar aplicaciones en la ingeniería civil y la edificación.

## 1.2 Metodología

Se elaboran morteros de cemento Pórtland fijando para todas las muestras las relaciones agua/cemento 0.5 en peso y árido/material cementante 3.83 en volumen. Se estudian con estas relaciones, porcentajes de sustitución de árido silíceo por GNEU, en los porcentajes de 40, 50, y 60% en volumen a los que se añade aditivo tensoactivo (Genapol PF-80) en las cantidades de 0.125, 0.25, 0.50, y 0.75% en peso de cemento. Se trata, por tanto de un diseño  $3^1 \cdot 4^1$ , resultando en 12 especímenes diferentes. Además se realizan las dosificaciones control V4K, V5K y V6K sin aditivo aireante, empleando aditivo superplastificante (Melment L-40) para los volúmenes de sustitución de 40, 50 y 60% en las cantidades de 0.5, 0.75 y 1.0% en peso de cemento respectivamente y un mortero estándar, MS, conservando las relaciones agua/cemento y árido/material cementante. Se realiza una amasada por tipo de mortero, con cantidad suficiente para confeccionar 3 probetas de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ .

Tabla 1.2. Niveles de trabajo estudiados

		V4	V5	V6
GENAPOL		40%	50%	60%
T1	0.125%	V4T1	V5T1	V6T1
T2	0.250%	V4T2	V5T2	V6T2
T5	0.500%	V4T5	V5T5	V6T5
T7	0.750%	V4T7	V5T7	V6T7

Se determina la trabajabilidad de las amasadas en estado fresco siguiendo el procedimiento descrito en EN 1015-3; el valor de

escurrimiento de determina por el valor medio de tres lecturas en cada amasada. Las probetas prismáticas elaboradas según EN196-1, se conservan en cámara húmeda a una temperatura de 20°C al 95% de humedad relativa durante 28 días. Se determina el peso saturado y seco de cada espécimen, tras la inmersión en agua durante 24 horas y su posterior secado en estufa a 60° durante 9 horas. Se realizan ensayos de velocidad de transmisión de ultrasonidos, de frecuencia de resonancia fundamental por impacto según EN 14146 y las resistencias mecánicas de flexión y compresión según EN 196-1 a las velocidades de carga de 1mm/min programando el fin de ensayo al 60% de la carga máxima. Se seleccionan los morteros V4T5, V5T5, V6T5, para la determinación de la conductividad térmica mediante la técnica de hilo caliente sobre probetas de 150x150x20 mm<sup>3</sup>.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Antecedentes

En los siguientes apartados se hará una revisión general de las propiedades de morteros y hormigones que incorporan residuos de neumático en diferentes formas.

#### 2.1.1 Trabajabilidad

La trabajabilidad es una propiedad compleja y de evaluación subjetiva, siendo resultado de la conjunción de otras propiedades del material en estado fresco tales como plasticidad, consistencia, retención y exudación de agua, masa específica, cohesión interna, adhesión y velocidad de endurecimiento.

La trabajabilidad empeora cuando se emplean agregados de caucho en morteros mientras que aumenta cuando se emplea en hormigones. No obstante, el tamaño y la forma del agregado de caucho influyen en la trabajabilidad [12-13]. La incorporación de caucho en hormigones, morteros o pastas causa una disminución del peso unidad en estado fresco.

#### 2.1.2 Propiedades mecánicas

La incorporación de caucho en pastas, morteros u hormigones provoca un detrimento de la resistencia mecánica. Sin embargo, aunque hay una gran disminución de resistencia, se alcanzan mayores deformaciones que hormigones y morteros convencionales. La merma de resistencia a flexión no es tan importante como a compresión. Influyen el tipo y el tamaño de partículas de caucho en el orden de magnitud. Existen varios modelos que intentan estimar la reducción de resistencia que supone la incorporación de caucho en la composición.

- El modelo exponencial de Pierce & Williams en [14]

$$\frac{f'_{c'rc}}{f'_c} = e^{-X \cdot R_a}$$

Donde:

$f'_{c'rc}$  Resistencia a compresión del hormigón con caucho.

$f_c'$	Resistencia a compresión del hormigón convencional.
Ra	Porcentaje de sustitución de árido por caucho.
X	Coefficiente de ajuste.

Tras ajustar los datos experimentales en hormigones de varios investigadores concluye que hay menos variación de resistencia a compresión que cuando se sustituye el árido de fracción gruesa por agregados de caucho, ya que el rango del coeficiente X es menor. El coeficiente X varía 1.50 a 2.70 para árido grueso y de 1.15 a 2.65 para árido fino.

- O el modelo potencial de Khatib & Bayomi [15], llamado *Strength Reduction Factor* (SRF).

$$SRF = a + b(1 - R)^m$$

Donde:

R	Volumen de incorporación de caucho en tanto por uno.
a,b,m	Coefficientes de ajuste. Se cumple que:

$$a + b = 1$$

De forma que cuando el contenido de neumático sea nulo ( $R=0$ ), el factor de reducción de resistencia es la unidad. El coeficiente  $m$  refleja el grado de curvatura de la función. Dando una idea de la sensibilidad del material a la incorporación de caucho cuanto mayor es el coeficiente.

Este modelo ha sido probado en datos experimentales, siendo el mejor ajuste tras haber probado diferentes modelos. Este modelo ha sido además empleado por otros investigadores en sus estudios en aras de comparar los resultados obtenidos [16].

La figura 1.3 muestra el detrimento de resistencia a compresión frente a la densidad, la cual disminuye al aumentar la cantidad de caucho en la composición de materiales base cemento. Para una misma densidad, la reducción de resistencia es mayor en hormigones que en pastas y en morteros [17].



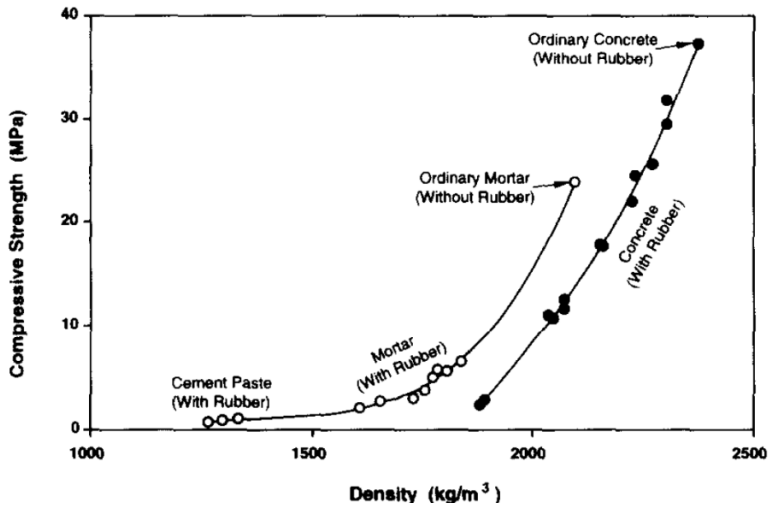


Figura 1.3. Pérdida de resistencia a compresión en función de la densidad. Fuente: Fattuhi & Clark 1996 [17].

Varios investigadores atribuyen la caída de resistencias a la pobre interfase, la diferencia de módulo elástico entre las partículas de caucho y la matriz, hasta el punto de considerar en algunos casos, las partículas como inclusiones o poros reduciendo la sección efectiva del material [16]. No obstante, Turatsinze et al. [18], apuntan que las partículas de caucho confinadas en la matriz contribuyen a la transmisión del esfuerzo. El efecto de caída de resistencias ha intentado ser paliado mediante el tratamiento previo de los agregados de caucho:

- Eldin & Senouci [10] lavan concienzudamente el agregado en aras de eliminar cualquier contaminante.
- Rostami et al. [19] Emplean  $\text{CCl}_4$  satisfactoriamente en hormigones. No obstante este solvente utilizado ampliamente en la industria ha sido abandonado por su toxicidad.
- Segre & Joeques [20] tratan el agregado de caucho con NaOH obteniendo mayor adherencia de las partículas a la matriz de cemento cuando son incorporadas en pastas de cemento.
- Albano et al. [21], utilizan tratamientos de NaOH y silano A-174 en partículas de caucho como sustitución del árido fino en hormigones. Estos tratamientos resultan ineficaces.
- Li et al. [22] tampoco encuentran eficaz, el tratamiento de las partículas de caucho con NaOH. Apunta que las

discrepancias obtenidas con los estudios de Segre & Joeekes pueden ser debidas al diferente subproducto de caucho utilizado, ya que éste último emplea polvos de caucho de mayor finura y por tanto con mayor superficie expuesta al ataque químico.

Sin embargo, todo tratamiento previo a los agregados de caucho, resta inmediatez a la disposición del residuo para su aplicación y el desarrollo de productos.

El módulo de elasticidad estático y dinámico disminuye en morteros y hormigones. Siguiendo los modelos anteriores de Pierce & Williams, y Khatib & Bayomi, se observa la misma ley de comportamiento. En este caso:

- Pierce & Williams [14]:

$$\frac{E_{rc}}{E_c} = e^{-X \cdot R_a}$$

- Khatib & Bayomi [15]:

$$ERF = a + b(1 - R)^m$$

Mientras que Topçu et al. modelizan el módulo de elasticidad tratándolo como un material compuesto, siguiendo la ley de mezclas y teniendo en cuenta las particularidades de este material compuesto [24].

$$E_c' = k' \cdot E_m \cdot \frac{1 + 2 \cdot \text{Var} \cdot \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha + 2}\right)}{1 - \text{Var} \cdot \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha + 2}\right)} \quad \alpha = \frac{E_{ar}}{E_m}$$

Donde:

$E_c'$	Módulo de elasticidad del composite
$E_m$	Módulo de elasticidad de la matriz
$E_{ar}$	Módulo de elasticidad del mortero
$V_{ar}$	Proporción en volumen del mortero
$K'$	Coefficiente de ajuste.

Por otra parte Benazzouk et al. resaltan la importancia de la textura alveolar de las partículas de caucho. Las partículas con textura alveolar, ERAC, muestran mayor cantidad de mortero alrededor de cada partícula de caucho, alcanzando mayor resistencia y módulo elástico que las partículas lisas, CRAC [24].

### 2.1.3 Comportamiento acústico

---

Son varios los investigadores que resaltan la habilidad de morteros y hormigones con caucho para amortiguar vibraciones y absorber sonido [17,25]. Khaloo et al. llevaron a cabo un análisis de onda ultrasónica para investigar la absorción de sonido y el módulo de elasticidad dinámico. Los resultados demuestran que el material es apropiado para absorber sonido y disipar la energía asociada a vibraciones [15].

Albano et al. estudian hormigones que incorporan dos granulometrías de residuos de caucho con tamaños máximos de 0.29 y 0.59 mm. De los datos obtenidos, es posible inferir que el mayores valores de atenuación se observan en los compuestos donde el caucho tiene el tamaño de las partículas más pequeñas, ya que muestran mayor presencia de porosidad, hecho que influye directamente en la propagación de los ultrasonidos, con una atenuación mayor y una menor velocidad de propagación [21].

Sukontasukkul utiliza el tubo de impedancia acústica para obtener la absorción acústica del material cuando estudia bajas-medias frecuencias (125, 250, 500 Hz), y altas frecuencias (1000, 2000 y 4000 Hz). El estudio concluye que tiene mayor capacidad de absorción que el hormigón convencional para frecuencias altas no mostrando diferencias significativas para bajas y medias frecuencias. El material compuesto no tiene tanta capacidad de absorción para todo el rango de frecuencias estudiado como el hormigón curado en autoclave, que demuestra ser superior. El estudio atribuye estas diferencias a la diferente densidad, entre 1800 y 2100 para hormigón con caucho, mientras que entre 400 y 800 para el hormigón curado en autoclave [26].

### 2.1.4 Comportamiento térmico

---

Paine et al. investigan tres series de dosificaciones de hormigón con diferentes cantidades de residuo de neumático triturado mecánicamente procedente de camiones, con tres granulometrías. La primera serie emplea bajos contenidos de adición de caucho, 5% y 10% en volumen, con relaciones a/c 0.35, 0.45, 0.55, 0.65. La segunda serie incorpora mayores cantidades, de 0 a 100% combinando dos granulometrías de residuo de neumático diferentes y una relación a/c de 0.45. La última serie estudia una dosificación optimizada (*rubcrete*), para conseguir ligereza, baja conductividad térmica y a la vez, la mayor resistencia a compresión posible. Los ensayos de conductividad térmica y resistencia a compresión de la

mezcla optimizada encuentran valores de similares a productos de construcción actualmente en el mercado [27].

Laidoudi et al. comprueban que la conductividad térmica disminuye al aumentar la cantidad de neumático y que al aumentar la cantidad de agua en las probetas aumenta la conductividad térmica siendo este aumento más pronunciado en morteros convencionales que en morteros que incorporan adición de caucho. Estos resultados ponen de manifiesto que la conductividad térmica no está influenciada únicamente por las características de los componentes sino también por su red de poros [28].

Benazzouk et al. estudian la conductividad térmica del compuesto experimentalmente mediante la técnica TPS, *transient plane source*, y analíticamente según el modelo de homogenización auto-coherente para un composite de tres fases: Mortero de cemento, partículas de neumático y aire.

$$\frac{k_e}{k_3} = 1 + \frac{fr}{\left(1 - \frac{fr}{3}\right) + \frac{1 + \frac{fc}{3} \cdot \left(\frac{k_1}{k_2} - 1\right)}{\frac{k_1}{k_2} - 1 - \frac{fc}{3} \cdot \left(\frac{k_1}{k_2} - 1\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot k_2}{k_3} + 1\right)}}$$

Donde:

Ke	Conductividad térmica equivalente
K <sub>1</sub>	Conductividad térmica del aire
K <sub>2</sub>	Conductividad térmica de las partículas de caucho
K <sub>3</sub>	Conductividad térmica de la matriz de mortero
fr	Fracción en volumen de las partículas de caucho
fc	Fracción en volumen del mortero.

Tras contrastar el modelo con los resultados experimentales, se advierte que éste sobreestima la conductividad térmica entre 3-14%, dependiendo del contenido de partículas. En definitiva se concluye que la adición de partículas de caucho al mortero de cemento como agregado reduce su conductividad térmica y en consecuencia se trata de un material interesante para ahorrar energía en las edificaciones [29].

### **2.1.5 Comportamiento al fuego**

---

Es la propiedad menos estudiada. Ensayos no planificados fueron realizados exponiendo varias probetas durante periodos de hasta 3 minutos. Las observaciones realizadas fueron que todo el caucho de la superficie fue quemado y tras detener la exposición a la llama cualquier foco de fuego se extinguía por sí mismo después de 4 a 5 segundos [17].

El aumento de cantidad de caucho en la dosificación disminuye la profundidad de daño cuando es empleado en hormigones de alta resistencia, de forma que incrementa la seguridad frente a incendio [30].

### 3. Experimental

#### 3.1 Materiales empleados

##### 3.1.1 Cemento

El cemento empleado es de tipo CEM I 52.5R suministrado por la empresa Asland de Puerto de Sagunto (Valencia). La composición química promedio del cemento Pórtland empleado es la que sigue:

Tabla 3.1. Composición química del cemento Pórtland CEM I 52.5R

Comp.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	*p.p.c
%peso	20.21	4.94	2.85	62.87	1.05	3.54	0.92	0.10	1.95

\*p.p.c: Pérdida por calcinación

##### 3.1.2 Árido

El árido empleado para la realización de los morteros fue árido síliceo AFA80 suministrado por la empresa Caolines Lapiedra de Lliria (Valencia) con un módulo de finura de 3.1.

##### 3.1.3 Granza de neumático

Los neumáticos se componen esencialmente de caucho sintético o natural, negro de carbono, óxido de zinc, acero, material textil y otros aditivos. La siguiente tabla proporciona un listado de las sustancias contenidas en los neumáticos utilizados en diferentes tipos de vehículos.

Tabla 3.2. Composición de los neumáticos en la UE.

Material	Turismo %	Camión / Autobús %
<b>Caucho/Elastómero</b>	48	43
<b>Negro de carbono</b>	22	21
<b>Metal</b>	15	27
<b>Textil</b>	5	--
<b>Oxido de Zn</b>	1	2
<b>Azufre</b>	1	1
<b>Aditivos</b>	8	6

\*Fuente: ETRA, European Tyre Recycling Association en [31]

Tabla 3.3. Composición química de los neumáticos usados.

Elemento/Compuesto	Contenido	Unidad
<b>C</b>	70	%
<b>Fe</b>	16	%
<b>H</b>	7	%
<b>O</b>	4	%
<b>Oxido de Zn</b>	1	%
<b>S</b>	1	%
<b>N<sub>2</sub></b>	0,5	%
<b>Acido esteárico</b>	0,3	%
<b>Halógenos</b>	0,1	%
<b>Ligandos Cupríferos</b>	200	mg/kg
<b>Cd</b>	10	mg/kg
<b>Cr</b>	90	mg/kg
<b>Ni</b>	80	mg/kg
<b>Pb</b>	50	mg/kg

\*Fuente: OFEFP en [31]

En la realización del estudio se emplea GNEU con un tamaño máximo de 2.2 mm suministradas por la empresa INSATURBO S.L.

### 3.1.3.1 Granulometría de GNEU

La granulometría ha sido analizada a partir de tamices según la serie de luces de malla de la normativa EN 196-1, obteniendo un módulo de finura de 3.90.

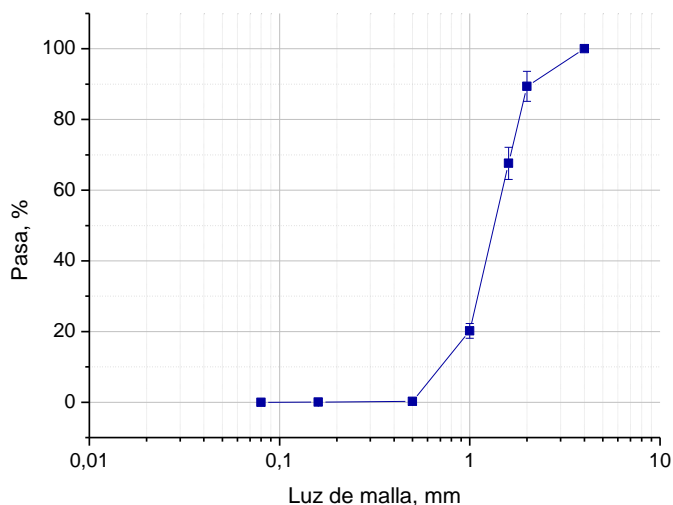


Figura 3.1. Granulometría de GNEU. Módulo de finura de  $3.90 \pm 0.34$ .

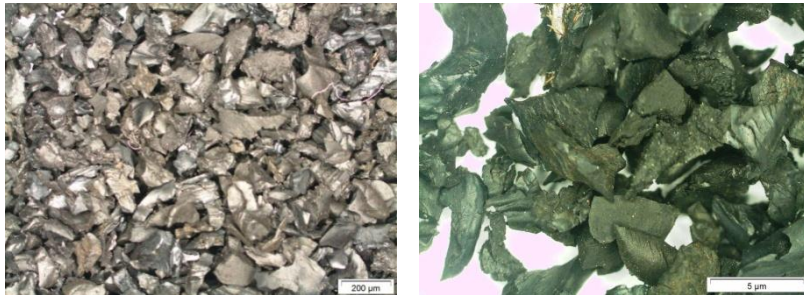


Figura 3.2. Granza de neumático empleada en la confección de los morteros.

### 3.1.3.2 Determinación de la densidad

Con el fin de realizar la sustitución del árido silíceo en volumen por GNEU es necesario conocer la densidad de ambos. Se determina la densidad por diferencia de volumen desplazado en probetas graduadas utilizando un líquido de menor densidad que el agua, ya que la densidad de la GNEU es muy cercana a la del agua. Es por ello que se emplea acetona con una densidad de  $0.78 \text{ g/cm}^3$ . Se realizan cuatro observaciones, obteniendo una densidad para GNEU de  $1.15 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ . Estos resultados no difieren de los obtenidos por otros autores a excepción de Benazzouk y Correia [25,32]. Sobre el árido fino se procede del mismo modo pero con agua, obteniendo una densidad de  $2.43 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ .

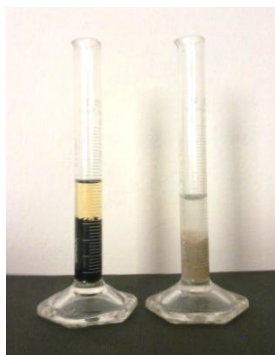
Tabla 3.4. Densidades de subproductos de NFU halladas por otros autores.

Autor	Densidad $\text{g/cm}^3$
Correia et al. [32]	0.405
Benazzouk et al. [25]	0.430
Hernández-Olivares & Barluenga [30]	0.840
Li et al. [22]	0.840
Del Rio Merino et al. [33]	0.840
Bignozzi [34]	0.900
Aiello [35]	1.089
Khatib & Bayomy [14]	1.120
Khaloo et al. [15]	1.150

Las diferencias obtenidas probablemente son debidas al tipo de producto (polvo, granza, tiras, etc.) y la procedencia, al origen del caucho, coche, camión o motocicleta.



Tabla 3.5. Lecturas para la determinación de la densidad de los agregados, por diferencia de volumen.



Tipo	Masa inicial, g	Volumen desplazado, cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>
GN	2.48	2.10	1.18
	2.28	2.00	1.14
	2.48	2.10	1.18
	2.67	2.40	1.11
Árido fino	63.30	26.00	2.43
	49.22	20.00	2.46
	14.08	6.00	2.35
	12.30	5.00	2.46

### 3.1.3.3 Análisis termogravimétrico

Los análisis térmicos se llevaron a cabo en una termobalanza Mettler-Toledo TGA850.

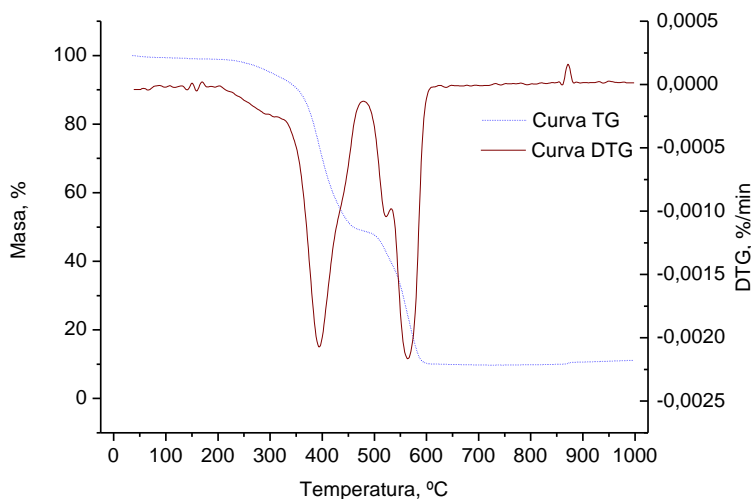


Figura 3.3. Curva TG y DTG de la GNEU

Los datos termogravimétricos demuestran el elevado contenido de materia orgánica, cercano al 85% en peso para GNEU. La descomposición de la materia orgánica (polímero de adición) se produce en dos etapas, la primera, alrededor de 350-400°C, atribuida a la volatilización de parte del material (50% de pérdida), y la

segunda, a mayor temperatura (500-600°C) que supone la oxidación del carbono remanente (35% de pérdida) después de la primera etapa.

### 3.1.4 Agua

Para la preparación de los morteros se utilizó agua potable procedente de la red de suministro de la Universidad Politécnica de Valencia.

### 3.1.5 Aditivos

En la preparación de morteros se utiliza el aditivo tensoactivo Genapol PF 80 suministrado por la empresa ADI-CENTER S.L, mientras que en la preparación de los morteros control que incorporan GNEU se emplea el aditivo superplastificante Melment L-40 fabricado por la empresa BASF Construction Chemical España S.L.

### 3.1.6 Dosificación

Las relaciones fijadas para todos los morteros de este estudio son:

- Relación agua/masa cementante de 0.5 en peso
- Relación árido/masa cementante de 3.83 en volumen

Tabla 3.6. Dosificación de los morteros

Tipo	CEM I 52.5R	Agua	GNEU	Árido fino	Genapol PF 80		
V4T1	450 g	225 g	255.56 g	810.00 g	0.56 g		
V4T2					1.13 g		
V4T5					2.25 g		
V4T7					3.38 g		
V5T1			319.44 g	675.00 g			0.56 g
V5T2							1.13 g
V5T5							2.25 g
V5T7							3.38 g
V6T1			383,33 g	540.00 g			0.56 g
V6T2							1.13 g
V6T5							2.25 g
V6T7							3.38 g
Tipo			CEM I 52.5R	Agua	GNEU	Árido fino	Melment L40
V4K			450 g	225 g	255.56 g	810.00 g	4.50 g
V5K	319.44 g	675.00 g			3.38 g		
V6K	383.33 g	540,00 g			2.25 g		

## 3.2 Equipos y procedimientos

### 3.2.1 Amasado de morteros

#### 3.2.1.1 Equipos de proceso de amasado

La amasadora para la realización de los morteros cumple las exigencias de la norma EN 196-1

- Recipiente de acero inoxidable de una capacidad de 5 litros, con forma y dimensiones normalizadas y equipada de manera que pueda ser fijada firmemente al bastidor de la amasadora durante el amasado y que la altura del recipiente con relación a la pala y por consiguiente, la separación entre la pala y recipiente, pueda ajustarse y mantenerse con precisión.
- Una pala de acero inoxidable, de forma y medidas normalizadas por EN 196-1, accionada por un motor eléctrico de velocidades controladas con movimientos de rotación sobre su propio eje, y con un movimiento planetario alrededor del eje del recipiente. Los dos sentidos de rotación deben ser opuestos, y la relación entre las dos velocidades debe ser un número entero. Velocidad lenta  $140 \pm 5$  y  $62 \pm 5$  rpm y velocidad rápida  $285 \pm 5$  y  $125 \pm 5$  rpm



Figura 3.4. Amasadora EN 196-1

El molde debe disponer de tres compartimentos horizontales para la preparación simultánea de tres probetas prismáticas de 40x40x160. El molde debe ser de acero con un espesor aproximado de pared de 10mm.



Figura 3.5. Molde de acero para las probetas EN 196-1

El equipo de compactación se compone de una mesa rectangular unida rígidamente por dos brazos ligeros a un eje de rotación, que dista 800 mm del centro de la mesa. Durante el funcionamiento, la mesa es levantada por una leva que le permite la caída desde una altura de  $15.0 \pm 0.3$  mm, entre el martinete y el yunque.

### 3.2.1.2 Procedimiento de amasado

---

La preparación de las probetas  $40 \times 40 \times 160$  mm<sup>3</sup> se realizó siguiendo el siguiente procedimiento:

- Amasado durante 30 segundos a velocidad lenta, la masa cementante con agua.
- Vertido de la GNEU uniformemente distribuida en el tiempo durante los siguientes 30 segundos.
- Amasado a velocidad rápida durante 30 segundos.
- Se deja reposar la mezcla 90 segundos, a la vez que se remueve del fondo y de las paredes del recipiente el material adherido los primeros 30 segundos.
- Vertido del árido silíceo durante 30 segundos a velocidad lenta.
- Adición del Genapol PF80 previamente disuelto en 25 ml del agua total de amasado.
- Amasado a velocidad rápida durante 90 segundos.
- Rellenado de los moldes de acero de dimensiones  $40 \times 40 \times 160$  mm<sup>3</sup>.

- Compactado mediante compactadora (mesa de golpes). Número de golpes 60 para confeccionar probetas de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$
- Compactado mediante mesa de vibración para la confección de placas de  $400 \times 400 \times 20 \text{ mm}^3$  durante 60 segundos.
- Enrasado de la superficie del molde con espátula, eliminando el mortero en exceso.

En estas condiciones, el mortero está preparado para iniciar el proceso de endurecimiento y curado en cámara húmeda.

### 3.2.2 Determinación de la trabajabilidad

La determinación de la trabajabilidad se realiza según el procedimiento descrito en la norma EN 196-1 y EN 1015-3. Para su determinación se emplea una mesa de sacudidas compuesta por:

- Un bastidor.
- Una placa rígida y un disco;
- Un eje horizontal y una leva de elevación
- Un eje de elevación



Figura 3.6. Mesa de sacudidas y molde de latón EN 1015-3

Se precisa además, un molde troncocónico de latón de 100mm de diámetro en su base inferior y de 70 mm en la parte superior, un pisón de aproximadamente 200 mm de longitud y 40 mm de diámetro, calibre, paleta y regla para enrasar.

Se coloca el molde en el centro del disco de la mesa de sacudidas; se introduce el mortero en dos capas, cada capa se debe compactar por lo menos con diez golpes de pisón con el fin de asegurar un llenado uniforme del molde.

Se elimina el exceso de mortero, se limpia y se seca la superficie libre del disco con el fin de que esté limpia y seca. Después de aproximadamente 15 s, se levanta lenta y verticalmente el molde e imprimiéndole a la mesa 15 sacudidas con una frecuencia constante de una sacudida cada segundo, el mortero se extiende por el disco. Se mide el diámetro del mortero en dos direcciones perpendiculares.

### 3.2.3 Curado

---

El curado se realiza en cámara húmeda; se trata de un habitáculo que mantiene unas condiciones de temperatura de 20°C al 95% de humedad relativa, cumpliendo con las condiciones de conservación y curado de probetas de mortero de cemento establecidas por la norma EN 196-1, temperatura 20°C  $\pm$  1°C y humedad relativa  $\geq$  90%.

Una vez realizado el amasado, el molde de acero (figura 3.5) se cubre con un cristal para evitar evaporación. El mortero fragua y endurece en la cámara húmeda durante 24 horas. Transcurridas las 24 horas se procede al desmolde de las probetas, las cuales se sumergen en agua y se conservan en la cámara húmeda para su curado durante 28 días. Transcurridos los 28 días de curado se determina el peso saturado y se introducen en estufa de secado a 60 $\pm$ 1°C durante 9 horas.



Figura 3.7. Estufa de secado.

### 3.2.4 Caracterización mecánica

La caracterización mecánica se lleva a cabo mediante una prensa electromecánica INSTRON, la cual incorpora un sistema de captación de datos y cálculo de parámetros con la versión del programa informático Bluehill® 2.0. Las velocidades de carga se fijan en 1mm/min para sendos ensayos, compresión y flexotracción a tres puntos. El fin del ensayo se programa al 60% de la máxima carga de compresión y hasta alcanzar una extensión del brazo de 1.5 mm en el caso de rotura a flexión.



Figura 3.8. Artificio para la determinación de la resistencia a flexión por tres puntos (izquierda) y compresión (derecha) según EN 196-1.

### 3.2.5 Caracterización óptica

Se utiliza un microscopio óptico modelo Olympus SZ61 el cual lleva incorporada una cámara para la captación de imágenes, modelo ALTRA 20.

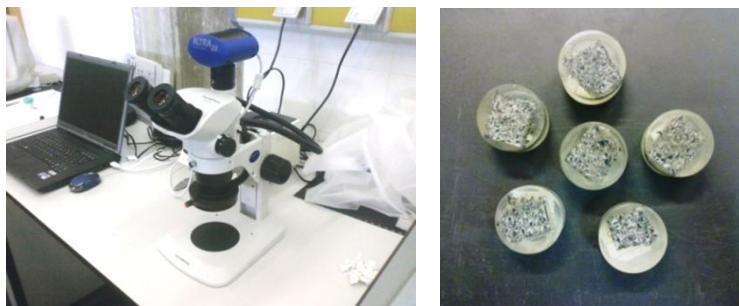


Figura 3.9 Microscopio óptico Olympus SZ61 (izquierda) y muestras embutidas en resina (derecha).

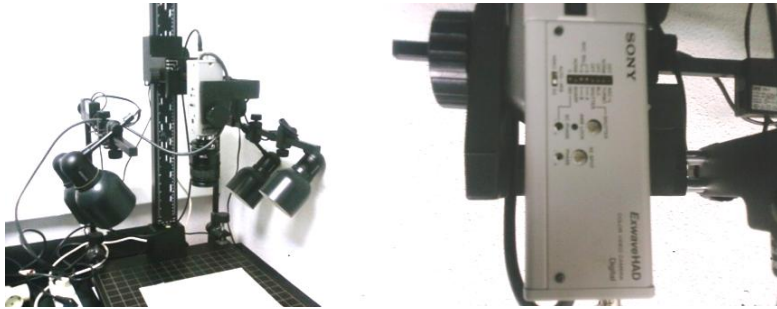


Figura 3.10 Cámara SONY ExwaveHAD y soporte.

Para la realización de las macrografías se emplea una cámara SONY ExwaveHAD®, la cual es una cámara de alta resolución y sensibilidad, apropiada para microscopía.

### 3.2.6 Velocidad de ultrasonidos

---

Se determina el tiempo de transmisión de ultrasonidos en sentido longitudinal, con el equipo H-2000 fabricado por la empresa Robotecno, por transmisión directa, según EN 12504. Se toma la medida cuando la lectura de tiempo de transmisión se estabiliza para cada probeta. Se obtiene la velocidad de las tres probetas de cada amasada al dividir la longitud de la probeta por el tiempo de transmisión.



Figura 3.11. Equipo de medición de tiempo de transmisión de ultrasonidos.



### 3.2.7 Resonancia

El ensayo de resonancia se realiza según el método y las condiciones de apoyo descritas en EN 14146, figura 3.11. La excitación se realiza mediante la caída libre de una bola de alúmina a través de un tubo de 120 mm de longitud y 25 de diámetro.

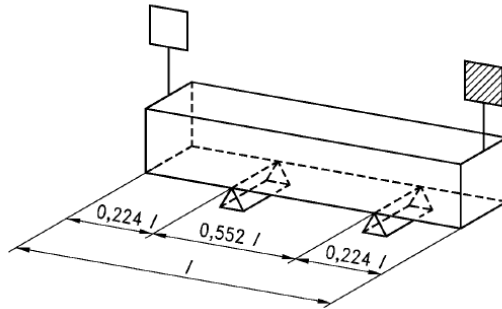


Figura 3.11. Condiciones de apoyo y posición del emisor y receptor para la vibración a flexión, EN 14146.

El equipo consta de un acelerómetro, un acondicionador de señal modelo 482A21 de PCB Piezotronics™ y un osciloscopio, stingray DS1M12 de EasySYNC™ Ltd. La captación de datos se realiza mediante el software EasyScope-II, suministrado por la misma empresa. Se registran 10 impactos por cada probeta, tres probetas por tipo de mortero. A partir de los registros de señal en el dominio del tiempo se determina la frecuencia fundamental de vibración a flexión mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal.

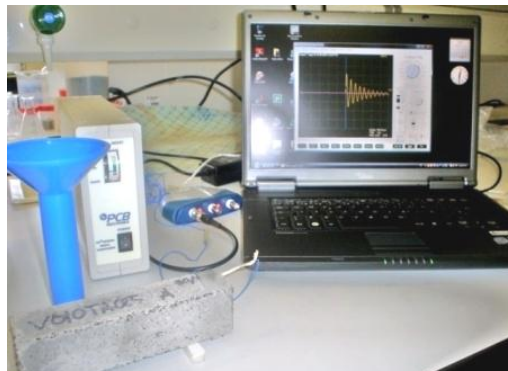


Figura 3.11. Dispositivo para la determinación de la frecuencia fundamental de resonancia a flexión

### 3.2.8 Conductividad térmica

---

La conductividad térmica se determina por el sistema de hilo caliente con el equipo FP2C fabricado por la empresa Neotim™. El método de hilo caliente permite estimar la conductividad térmica del material a partir de la evolución de temperatura medida por un termopar emplazado en la proximidad de un hilo resistivo. Conductividad de 0.02 a 5 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> y temperatura de medida de -20 a 80°C.



Figura 3.12. Hilo caliente, www.neotim.com

Se confeccionan placas de 400x400x20 mm<sup>3</sup> de la que se extraen 4 placas de 150x150x20 mm<sup>3</sup> (A, B, C, D) que se ensayan por los pares (AB y CD) obteniendo dos lecturas por par de placas ensayadas, en total 4 lecturas de conductividad térmica por tipo de mortero.



Figura 3.13. Escuadría de las placas de 400x400x20 mm<sup>3</sup> para los ensayos de conductividad térmica (izquierda) y placa V6T5 confeccionada (derecha).

### 3.2.9 Caracterización SEM

---

La caracterización microestructural se lleva a cabo con un microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo JEOL JSM6300. La alta resolución del SEM requiere finas películas conductoras para aprovechar plenamente su potencia de aumento. Las muestras se

recubren de grafito mediante un equipo de pulverización catódica modelo BALTEC SCD 005 para SEM. Los parámetros del proceso de recubrimiento son los siguientes:

- Distancia de la muestra: 5 mm
- Tiempo de recubrimiento: 90 s
- Corriente: 40 mA
- Presión: 0,024 mbar
- Espesor de la capa: 5-7nm

Las imágenes se obtienen mediante el equipo SEM a partir de los electrones secundarios generados en las siguientes condiciones:

- Voltaje de 20 kV
- Distancia de trabajo de 15mm

## 4. Resultados y discusión

Se han caracterizado propiedades físicas y mecánicas de composites de matriz de mortero de cemento y GNEU incorporando además un agente aireante, variando las cantidades de GNEU y de aditivo tensoactivo a 3 y 4 niveles respectivamente.

Tabla 4.1. Niveles de trabajo estudiados

GENAPOL		T1	T2	T5	T7	CONTROL	
		0.125%	0.250%	0.500%	0.750%		
V4	40%	V4T1	V4T2	V4T5	V4T7	V4K	MS
V5	50%	V5T1	V5T2	V5T5	V5T7	V5K	
V6	60%	V6T1	V6T2	V6T5	V6T7	V6K	

En los siguientes apartados se discuten las propiedades estudiadas:

- Trabajabilidad o escurrimiento.
- Densidad aparente en seco y absorción.
- Velocidad de transmisión de ultrasonidos y resonancia.
- Resistencia mecánica a flexión y compresión.
- Conductividad térmica.

### 4.1 Caracterización en estado fresco. Trabajabilidad

No es posible obtener morteros trabajables para los porcentajes de sustitución estudiados sin la incorporación de aditivos. Los morteros V4K, V5K y V6K son morteros secos que presentan *balling* o la formación de aglomerados de material disgregado de la probeta durante la compactación. Estos morteros no son deseables en la práctica. Puede evitarse este fenómeno aumentando la relación a/c o empleando aditivos superplastificantes. Sin embargo, con el aumento de la cantidad de agua y el exceso en la dosificación de superplastificante se puede producir la segregación del mortero. Existen diferentes formas de evitar esto último. En particular Turatsinze [36] emplea diferentes aditivos superplastificantes y aireantes para evitar la segregación en hormigones con agregados de caucho.



Figura 4.1. Formación de *balling* en el mortero V5K durante la confección de probetas de 40x40x160mm<sup>3</sup>.

Según los ensayos de trabajabilidad realizados en todas las series podemos observar en la tabla 4.2 que el escurrimiento (E) aumenta al incrementar el porcentaje de aditivo tensoactivo, y aunque la incorporación de GNEU disminuye la trabajabilidad del mortero durante el amasado, el aditivo aireante iguala los valores de escurrimiento haciendo que sea prácticamente independiente del porcentaje de sustitución en volumen de árido por GNEU. Se puede observar que toda la figura 4.2 obedece a un modelo potencial con independencia del volumen de agregado de GNEU incorporado en los morteros.

Tabla 4.2. Asentamiento en la mesa de sacudidas. Promedio y desviación estándar.

TIPO	E (mm)
MS	--
V4K	131 ± 1
V4T1	136 ± 3
V4T2	173 ± 3
V4T5	178 ± 2
V4T7	192 ± 3
V5K	116 ± 2
V5T1	135 ± 2
V5T2	173 ± 4
V5T5	185 ± 3
V5T7	189 ± 2
V6K	107 ± 4
V6T1	122 ± 1
V6T2	172 ± 3
V6T5	187 ± 2
V6T7	191 ± 1

Los datos de trabajabilidad han sido ajustados a modelos de tipo logarítmico, exponencial y potencial, mostrando mayor grado de

correlación el modelo potencial de Belehradek [37], el cual es ampliamente utilizado en microbiología para modelar crecimiento microbiano en función de la temperatura.

$$y = a \cdot (x - b)^c \quad (4.1)$$

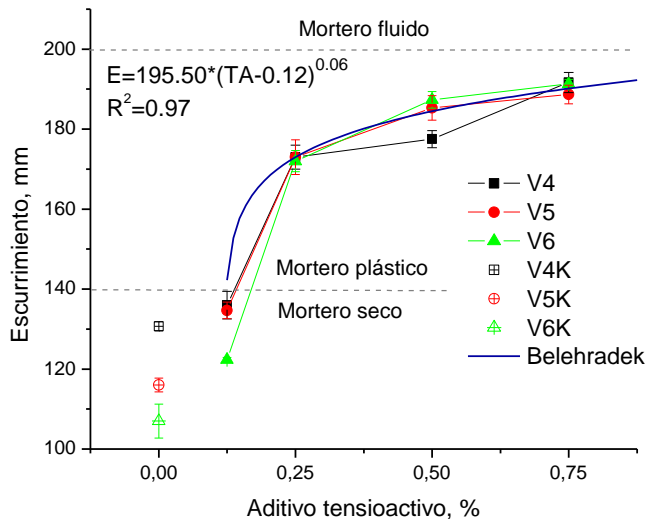


Figura 4.2. Valores de escurrimiento en la mesa de sacudidas y clasificación de los morteros EN 1015-6.

Obviamente, la interpretación de los parámetros del modelo de Belehradek es diferente en este estudio. El exponente  $c$ , nos revela el grado de curvatura de la función, y  $b$  es el valor de la asíntota vertical que nos delimita el contenido mínimo de tensioactivo para obtener un mortero trabajable. Además la función solo existe en el dominio real positivo, por lo que no podemos tener valores de escurrimiento negativo. Con todas estas consideraciones, la ecuación ajustada es la siguiente:

$$E = 195.50 \cdot (TA - 0.12)^{0.06} \quad (4.2)$$

Donde  $E$  es el valor del escurrimiento en milímetros y  $TA$  la cantidad de tensioactivo en porcentaje en peso de cemento. No obstante, cuando el valor de  $TA$  alcanza 0.12 el valor de  $E=0$ , lo que no tiene sentido físico. Es por ello que es más conveniente sustituir la variable  $E$  por  $\Delta E = E - E_0$ , donde  $E_0$  es el diámetro de la base del cono, 100 mm. Por tanto, la ecuación queda:

$$\Delta E = 96.067 \cdot (TA - 0.125)^{0.136} \quad (4.3)$$

De esta manera, la variación de escurrimiento es cero cuando el porcentaje de aditivo alcanza el valor de 0.125%. Por tanto no existe asiento. Ahora queda perfectamente definido el proceso sin incongruencias. La expresión pone de manifiesto que el porcentaje de tensoactivo tiene gran influencia en la trabajabilidad para valores pequeños, donde la función crece a mayor velocidad, y ésta se amortigua, disminuyendo la eficacia del aditivo a medida que éste aumenta en la dosificación.

Cuando ajustamos cada serie de forma independiente podemos observar como los parámetros *a* y *c* aumentan ligeramente para los morteros con menor cantidad de árido silíceo, tabla 4.3, indicando una mayor sensibilidad a la incorporación de aditivo. La capacidad de generar burbujas de aire por parte del tensoactivo aumenta con la incorporación de aditivo, disminuyendo su viscosidad. En consecuencia, el aire generado tiene mayor capacidad de movimiento a través del mortero en estado fresco, formando burbujas grandes a partir de pequeñas. Estas diferencias se reflejan en la figura 4.3.

Tabla 4.3. Parámetros de ajuste del modelo en series con igual contenido en GNEU.

Serie	a	b	c	R <sup>2</sup>
V4	193.61	0.123	0.059	0.97
V5	194.39	0.124	0.055	0.99
V6	198.53	0.124	0.067	0.99

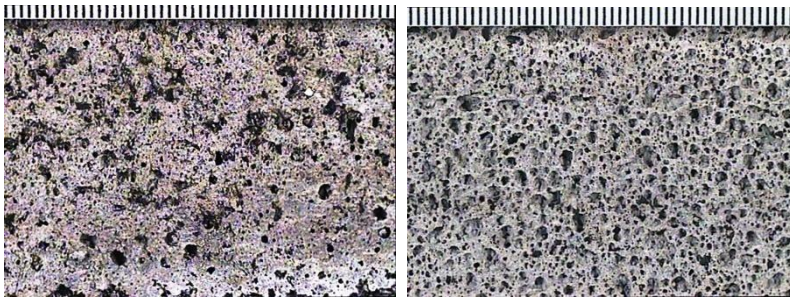


Figura 4.3. Superficie lateral de probetas: V4T1 (derecha) y V6T7 (izquierda).

## 4.2 Densidad aparente en seco y absorción de agua

La densidad aparente en seco ( $D_{ap}$ ) y porcentaje de agua absorbida (Abs) se definen como las relaciones (4.3) y (4.4) respectivamente, tras haber determinado la masa seca ( $P_d$ ) y saturada ( $P_s$ ) de la probeta. Donde  $V_{ap}$  es el volumen interior del las caras del molde,  $256 \text{ cm}^3$ , y  $P_d$  es la masa seca obtenida tras desecar las probeta en estufa a  $60 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta obtener masa constante, alcanzando como máximo 9 horas de secado.

$$D_{ap} = \frac{P_d}{V_{ap}} \quad (4.3)$$

$$\text{Abs}(\%) = \frac{P_s - P_d}{P_d} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Tabla 4.3 Densidad aparente en seco y porcentaje de absorción de los morteros.

TIPO	$D_{ap} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Abs (%)
MS	$2.17 \pm 0.01$	2.31
V4K	$1.72 \pm 0.01$	9.03
V4T1	$1.68 \pm 0.01$	9.40
V4T2	$1.33 \pm 0.01$	18.34
V4T5	$1.24 \pm 0.02$	23.96
V4T7	$1.14 \pm 0.02$	32.35
V5K	$1.61 \pm 0.01$	4.03
V5T1	$1.56 \pm 0.01$	6.99
V5T2	$1.27 \pm 0.01$	17.98
V5T5	$1.15 \pm 0.02$	26.49
V5T7	$1.03 \pm 0.01$	34.35
V6K	$1.50 \pm 0.01$	10.75
V6T1	$1.39 \pm 0.01$	8.88
V6T2	$1.09 \pm 0.02$	25.85
V6T5	$0.96 \pm 0.01$	40.29
V6T7	$0.98 \pm 0.01$	37.96

Tras la lectura de la tabla 4.3, donde se recogen los valores de densidad aparente en seco y de absorción, se concluye que la densidad aparente en seco disminuye a medida que aumenta la sustitución de árido silíceo, ya que su densidad es aproximadamente el doble que la del GNEU, así como disminuye al aumentar la cantidad de aditivo tensoactivo. Además, a medida que disminuye la densidad aparente en seco aumenta la capacidad de absorción de agua.

En la figura 4.4 se representan los valores hallados del coeficiente de absorción para los distintos niveles de sustitución de árido por GNEU



y de incorporación de aditivo aireante. En todos los casos, los valores de absorción son superiores al mortero control, MS. La cantidad de GNEU no parece influir significativamente para los morteros K y T1, sin embargo para mayores porcentajes de aditivo tensoactivo, cuanto mayor es la cantidad de GNEU, mayor es la cantidad de absorción. Por tanto, los morteros con mayor contenido en GNEU son capaces de incorporar mayor contenido de aire a medida que aumenta la cantidad de aditivo, lo que implica un aumento de la porosidad conectada y en consecuencia de absorción de agua.

Los resultados están de acuerdo con anteriores investigaciones. Fedroff et al. reportaron mayores cantidades de aire en hormigones con caucho que hormigones control incluso sin el uso de aditivos aireantes [38]. Observaciones similares fueron hechas por Khatib & Bayomy [15]. Siddique et al. señalan que este efecto puede ser debido a la naturaleza no polar del caucho y a su tendencia a atrapar aire en su superficie rugosa [39].

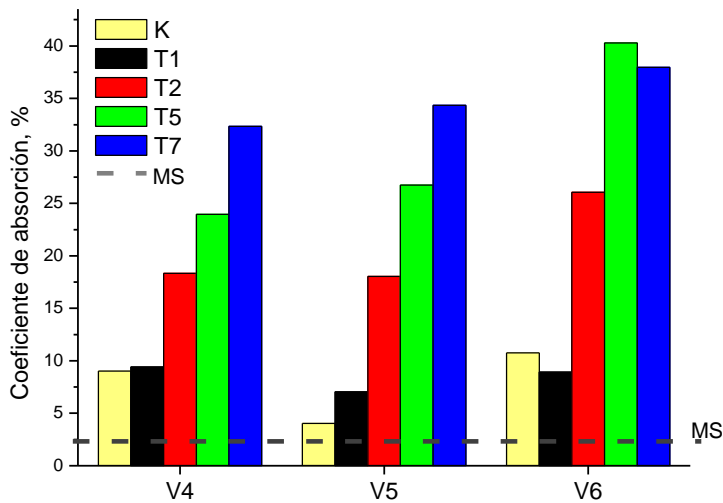


Figura 4.4. Coeficiente de absorción de los morteros.

En la figura 4.5 se muestran imágenes tomadas con microscopio óptico, sobre muestras embutidas en resina, con cantidades diferentes de GNEU y aditivo tensoactivo (V4T2 y V6T7). Se diferencian las partículas de caucho rodeadas de una zona oscura perimetral evidenciando una interfase deficiente, en este caso también, entre la resina y las partículas de caucho. Las formas

poligonales más claras corresponden a la matriz de cemento, mientras que las más oscuras corresponden a la GNEU. Se puede observar que la cantidad de mortero que rodea las partículas de caucho es menor en la muestra con mayor cantidad de aditivo (V6T7) que en la muestra con menor cantidad (V4T2).

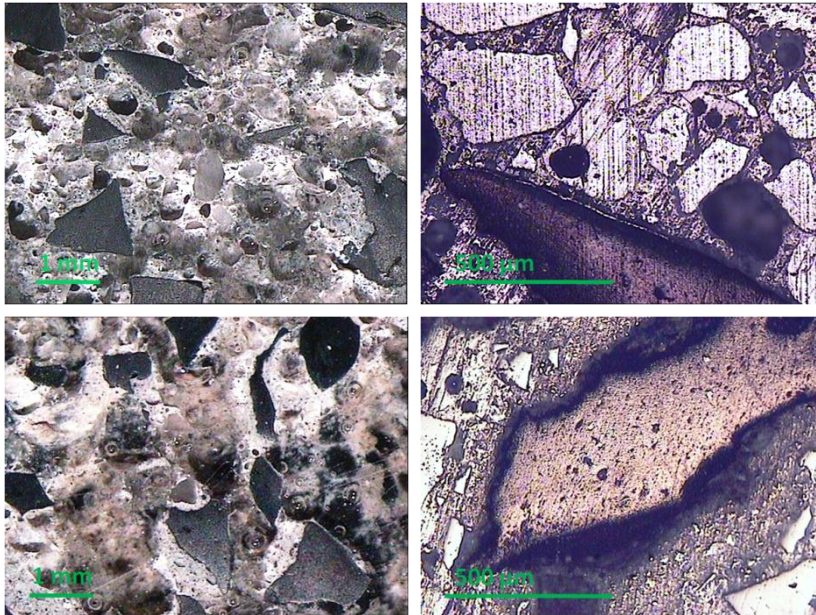


Figura 4.5. Imágenes tomadas con microscopio óptico a 10X (izquierda) y 50X (derecha). Mortero V4T2 (arriba) y mortero V6T7 (abajo).

### 4.3 Velocidad de ultrasonidos y resonancia

La velocidad de las ondas longitudinales disminuye con el aumento de las discontinuidades en el material, lo que revela la habilidad del material para reducir la intensidad del sonido y en consecuencia amortiguar vibraciones. A partir de la velocidad de las ondas ultrasónicas podemos obtener el módulo de elasticidad mediante la expresión:

$$E_d = \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \cdot \rho \cdot C_l^2 \quad (4.5)$$

Donde  $\nu$  es el coeficiente de Poisson,  $\rho$  es la densidad y  $C_l$  la velocidad de las ondas longitudinales a través del material. No obstante, es necesario conocer el coeficiente de Poisson, lo que precisa de equipos y sensores dedicados al efecto y es difícil medir

en la práctica. Sin embargo, para este tipo de materiales está comprendido entre 0.2 y 0.3 [40]. Como el primer término tiende a la unidad, en ocasiones se simplifica por la ecuación (4.6). De esta manera el módulo de elasticidad dinámica esta sobrestimado entre un 11% y 35% para los valores del coeficiente de Poisson 0.2 y 0.3.

$$E_d \approx \rho \cdot C_1^2 \quad (4.6)$$

Por otra parte, podemos calcular el módulo de elasticidad dinámico a partir del valor de frecuencia fundamental de resonancia a flexión (EN 14146) mediante la expresión (4.7).

$$Edf = 15.136 \cdot 10^{-6} \cdot l^2 \cdot F_f^2 \cdot \rho \cdot C \quad (4.7)$$

Donde  $E_{df}$  representa el módulo de elasticidad dinámico de flexión en MPa,  $l$  la longitud de la probeta en m,  $F_f$  la frecuencia fundamental de resonancia a flexión en Hz,  $\rho$  la densidad aparente en  $\text{Kg/m}^3$ ,  $C$  el coeficiente de corrección de valores entre 1.425 y 1.450 para los coeficientes de Poisson de 0.2 y 0.3 respectivamente.

Dado que los módulos dinámicos  $E_d$  y  $E_{df}$  son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad de transmisión de los ultrasonidos y a la frecuencia fundamental de resonancia a flexión, podemos concluir que los respectivos módulos de elasticidad dinámicos disminuyen al aumentar el tensoactivo y el contenido de GNEU, como puede apreciarse en las tablas 4.4 y 4.5. Por tanto,  $E_d$  y  $E_{df}$  son indicadores sensitivos a la pérdida de adherencia y del nivel de discontinuidades en el material como ha demostrado en otros estudios [41]. Sin embargo, las expresiones antes mencionadas para calcular el módulo de elasticidad dinámico son válidas para materiales isotropos, homogéneos y perfectamente elásticos [42], lo cual es aplicable a morteros y hormigones convencionales [43] pero no a estos materiales compuestos que presentan discontinuidades.

A tal efecto, el índice de continuidad  $Cl_v$  propuesto por Gorisse [44] es un parámetro que tiene en cuenta las discontinuidades en el material, ya que normaliza los valores de velocidad a partir de la velocidad de referencia en el material sin discontinuidades  $C_{OL}$ . En este caso, utilizamos la velocidad de transmisión del espécimen MS (mortero control estándar), con un valor de 4203.15 m/s como referencia. Atendiendo a que el índice  $Cl_v$ , ecuación (4.8), está relacionado con la expresión (4.5), éste es función de la velocidad del sonido en el material, del coeficiente de Poisson, del módulo de elasticidad dinámico, de la densidad, además de variables no contempladas directamente en (4.5) como la porosidad.

$$C_{IV} = \frac{c_L}{c_{OL}} \quad (4.8)$$

Tabla 4.4. Propiedades dinámicas (I) de las muestras estudiadas.

Muestra	Velocidad (m/s)	Ed sobreestimado (GPa)	CI Gorisse
MS	4203.15 ± 27.82	38.40	1.00
V4K	2436.55 ± 57.60	10.26	0.58
V4T1	2364.53 ± 33.24	9.38	0.56
V4T2	1976.94 ± 103.45	5.18	0.47
V4T5	1736.61 ± 60.87	3.73	0.41
V4T7	1498.13 ± 105.66	2.56	0.36
V5K	2338.04 ± 29.57	8.80	0.56
V5T1	2302.16 ± 21.77	8.29	0.55
V5T2	1582.59 ± 25.78	3.17	0.38
V5T5	1361.70 ± 49.24	2.13	0.32
V5T7	1177.05 ± 4.36	1.43	0.28
V6K	1832.76 ± 22.82	5.31	0.44
V6T1	1558.95 ± 16.19	3.38	0.37
V6T2	1161.66 ± 24.16	1.48	0.28
V6T5	956.65 ± 34.51	0.91	0.23
V6T7	987.05 ± 39.48	0.96	0.23

Media de tres valores ± desviación estándar.

Análogamente al anterior índice de continuidad, podemos definir un nuevo índice  $C_{If}$  a partir de la frecuencia fundamental de resonancia a flexión de cada mortero  $F_f$ , normalizando sus valores respecto a la frecuencia obtenida para el mortero control MS  $F_{of}=2641.39$  Hz. De esta forma salvamos tener que obviar las variaciones del módulo de Poisson en la terna de morteros estudiados.

$$C_{If} = \frac{F_f}{F_{of}} \quad (4.9)$$

Por tanto, ante las razones expuestas en los anteriores párrafos, los índices de continuidad son más apropiados, como indicadores sensibles de cambios en el material que los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos por velocidad de ultrasonidos o por resonancia. En las tablas 4.4 y 4.5 quedan recogidos los valores de los módulos dinámicos y los índices de continuidad medidos a partir de la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas. Podemos observar en las tablas 4.4 y 4.5 que los valores de ambos índices de continuidad  $C_{IV}$  y  $C_{If}$ , disminuyen cuando aumentamos la cantidad de tensoactivo y GNEU en la dosificación, al igual que disminuye la densidad aparente en seco, como se ha comentado en el apartado anterior. Podemos expresar la disminución de la densidad aparente

en seco en función de sendos índices, ya que guardan buena correlación siguiendo el modelo exponencial Box-Lucas, figura 4.6. Se aprecia como los valores de densidad frente dichos índices de continuidad son prácticamente paralelos, lo que indica una relación lineal entre ambos. El Clv de Gorisse se muestra entre un 22% y un 44% mayor al índice de continuidad en términos de la frecuencia fundamental de resonancia a flexión, Clf.

Tabla 4.5. Propiedades dinámicas (II) de las muestras estudiadas

Muestra	$F_f$ (Hz)	$E_{df}$ (GPa)	Q factor	Clf
MS	2641.39 ± 24.67	8.37	58.19 ± 16.54	1.00
V4K	1239.45 ± 29.90	1.47	15.95 ± 2.42	0.47
V4T1	1199.13 ± 51.51	1.33	15.66 ± 1.68	0.45
V4T2	943.60 ± 33.45	0.65	8.83 ± 1.10	0.36
V4T5	811.16 ± 38.44	0.45	8.19 ± 1.28	0.31
V4T7	697.11 ± 22.44	0.31	6.52 ± 2.33	0.26
V5K	1203.00 ± 36.17	1.29	13.53 ± 1.58	0.46
V5T1	1211.75 ± 35.41	1.27	16.22 ± 2.01	0.46
V5T2	767.15 ± 23.62	0.41	9.41 ± 0.90	0.29
V5T5	614.83 ± 49.11	0.24	7.42 ± 1.21	0.23
V5T7	587.43 ± 33.93	0.20	9.57 ± 2.79	0.22
V6K	830.51 ± 22.28	0.60	10.73 ± 0.87	0.31
V6T1	738.73 ± 9.14	0.42	11.41 ± 0.89	0.28
V6T2	539.21 ± 24.21	0.18	7.38 ± 0.85	0.20
V6T5	425.07 ± 37.20	0.10	8.12 ± 2.88	0.16
V6T7	449.62 ± 50.01	0.14	7.37 ± 2.33	0.17

Media de tres valores ± desviación estándar.

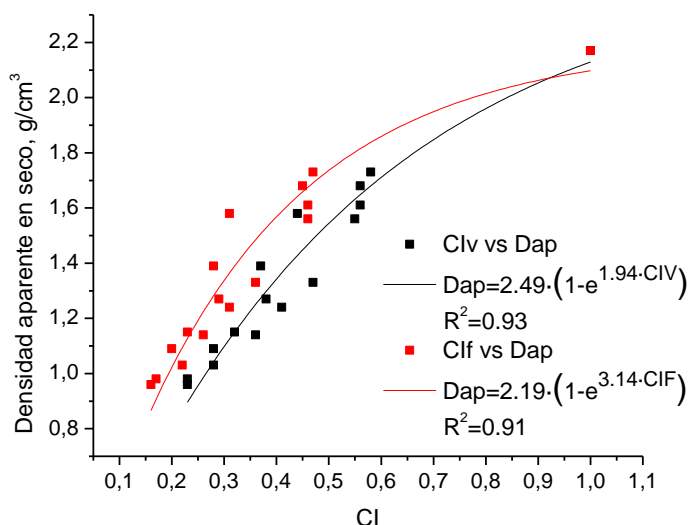


Figura 4.6. Correlación de la densidad aparente en seco frente al índice de continuidad.

Además, las vibraciones van acompañadas de una pérdida de energía debido al rozamiento interno y a la compresión-descompresión del sólido. Como consecuencia de ello, la amplitud de las vibraciones disminuye y la energía disipada aumenta con el tiempo. Por tanto, se registra una mayor atenuación de las vibraciones al aumentar la cantidad de GNEU y tensoactivo, figura 4.7, en definitiva al aumentar la cantidad de discontinuidades en el material. Este efecto lo podemos evaluar a través del decremento logarítmico, ecuación (4.10), donde  $A_0$  y  $A_n$  son respectivamente la amplitud inicial y la existente después de  $n$  ciclos. A mayor valor de decremento logarítmico, mayor atenuación de las vibraciones.

$$\zeta = \frac{1}{2n\pi} \cdot \ln \left( \frac{A_0}{A_n} \right) \quad (4.10)$$

El decremento logarítmico ha sido calculado para los valores de 10 y 25 ciclos de 6 respuestas de vibración en el dominio del tiempo para cada mortero, cuyos valores quedan recogidos en la tabla 4.6. Aunque en rigor, la frecuencia de excitación no debe variar más de un 1 % entre ciclo y ciclo para evaluar el decremento logarítmico [45], su cálculo nos revela un aumento del decremento logarítmico. Por ejemplo, para el caso de V4T7 representa un aumento del 244% para 10 ciclos respecto al mortero sin aireante V4K y de un 444% respecto al mortero convencional MS.

Tabla 4.6. Decremento logarítmico en la serie de morteros V4 y MS.

Tipo	$\zeta_{10}$	$\zeta_{25}$
MS	0.016 ± 0.000	0.011 ± 0.000
V4K	0.029 ± 0.007	0.023 ± 0.003
V4T2	0.053 ± 0.015	0.024 ± 0.001
V4T5	0.051 ± 0.012	0.026 ± 0.001
V4T7	0.071 ± 0.012	0.026 ± 0.004

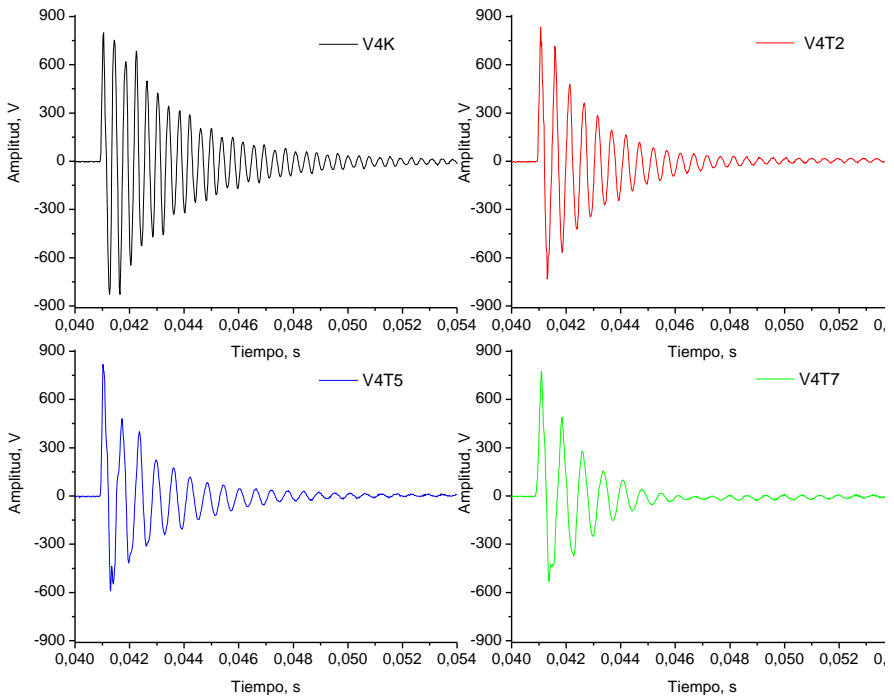


Figura 4.7. Atenuación de la amplitud en el dominio del tiempo.

Al evaluar el espectro en frecuencia tras realizar la transformada rápida de Fourier (FFT) de las señales y obtener la frecuencia fundamental de resonancia a flexión, cuyos valores quedan recogidos en la tabla 4.5, se aprecia un desplazamiento de la posición de la frecuencia fundamental en función de la amplitud, figura 4.8. Este fenómeno está asociado a una pérdida de adherencia entre los constituyentes del material [41]. En nuestro caso, entre la fase dispersa (GNEU) y la matriz de mortero de cemento.

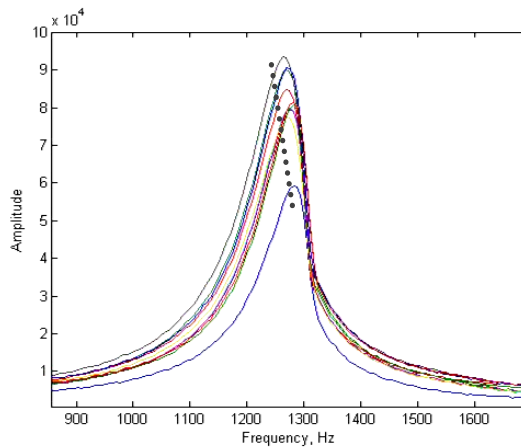
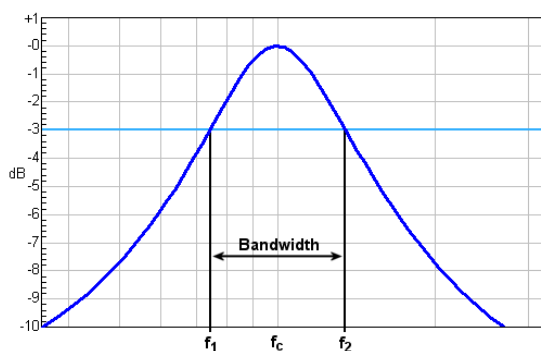


Figura 4.8. Aumento de la frecuencia fundamental a flexión con la disminución de amplitud en el mortero V4K.

Por otra parte, a partir de la respuesta en frecuencia podemos calcular el factor de calidad  $Q$ , el cual es el resultado de la relación (4.11) tras identificar las frecuencias secantes del espectro en frecuencia para una disminución de la amplitud máxima de la señal en un factor  $2^{-7/2}$ , figura 4.10. El factor de calidad también está íntimamente relacionado con el nivel de discontinuidades en el material.

Aunque el valor de  $Q$  está subestimado, ya que cuando se generan armónicos no es apropiado calcular el factor de calidad ( $Q$ ) [46], se puede comprobar que este disminuye a medida que el grado de discontinuidades en el material es mayor, o lo que es igual, cuando aumenta la cantidad de tensoactivo. Sin embargo los cambios del valor de  $Q$  cuando los comparamos para una misma cantidad de aditivo, son de menor magnitud que cuando los comparamos para una misma cantidad de GNEU, efecto que podemos observar en la figura 4.9. Para una misma cantidad de GNEU, la frecuencia fundamental a flexión se desplaza hacia la izquierda y disminuye su amplitud y su factor de calidad  $Q$ , a medida que la cantidad de aditivo aumenta. Mientras que para una misma cantidad de tensoactivo, 0.5% en la figura 4.9.a, no existen cambios importantes en el valor de  $Q$ . En tanto el valor de frecuencia está relacionado con el módulo dinámico, como se ha comentado anteriormente, podemos ver como éste disminuye con la incorporación de aditivo y de GNEU, figura 4.9.a y b.





$$Q = f_c / (f_2 - f_1) \quad (4.11)$$

Figura 4.10. Calculo del factor de calidad Q.

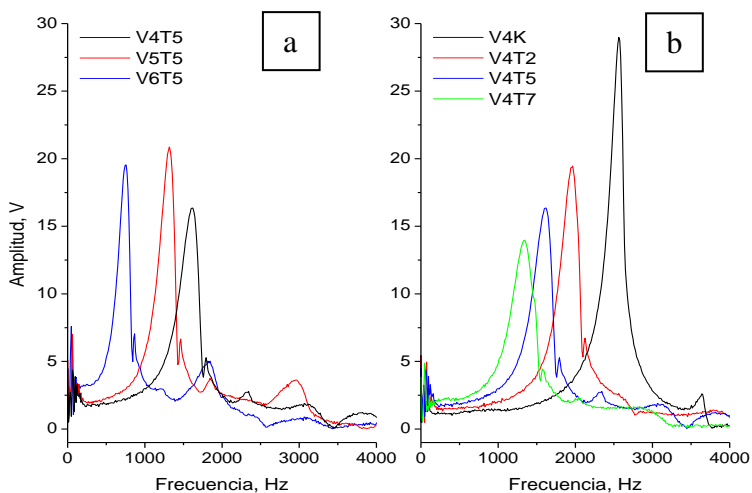


Figura 4.9. Frecuencia fundamental de resonancia en flexión.

#### 4.4 Resistencia mecánica

La incorporación de GNEU en morteros y hormigones causa un detrimento de la resistencia mecánica. De los valores de la tabla 4.7 se deduce que las incorporaciones de GNEU y de aditivo tensoactivo disminuyen la resistencia mecánica del mortero en módulo y esfuerzo máximo, ya sea a compresión o a flexión. La reducción es en todos los casos de tipo exponencial. La resistencia a flexión, aun no siendo un indicador resistente de valores destacables en este material frangible, sufre una pérdida respecto a los morteros control sin incorporación de aireante. Aunque Toutanji et al. apuntan que la pérdida de resistencia a flexión es de menor magnitud que en la resistencia a compresión [47], los grandes volúmenes de sustitución de árido por GNEU y la incorporación de aireante, igualan ambos detrimentos. Por ejemplo, la reducción de resistencia a flexión del mortero V4T2 respecto el mortero control MS es de 90.5% y de 92.2% a compresión.

Tabla 4.7. Propiedades mecánicas.

Tipo	Rf, MPa	Rc, MPa	*Ec (GPa)
<b>MS</b>	10.86 ± 1.38	52.13 ± 2.29	--
<b>V4K</b>	2.50 ± 0.05	11.55 ± 0.74	1.24 ± 0.01
<b>V4T1</b>	1.81 ± 0.29	10.04 ± 0.45	1.14 ± 0.01
<b>V4T2</b>	1.03 ± 0.02	4.08 ± 0.24	0.56 ± 0.01
<b>V4T5</b>	0.71 ± 0.07	2.89 ± 0.14	0.38 ± 0.01
<b>V4T7</b>	0.48 ± 0.01	1.91 ± 0.12	0.29 ± 0.01
<b>V5K</b>	2.22 ± 0.18	10.57 ± 0.57	1.06 ± 0.01
<b>V5T1</b>	1.78 ± 0.05	8.45 ± 0.31	1.03 ± 0.01
<b>V5T2</b>	0.75 ± 0.08	3.18 ± 0.08	0.42 ± 0.01
<b>V5T5</b>	0.50 ± 0.09	1.84 ± 0.07	0.23 ± 0.01
<b>V5T7</b>	0.47 ± 0.09	1.38 ± 0.21	0.19 ± 0.01
<b>V6K</b>	1.21 ± 0.75	5.80 ± 0.35	0.78 ± 0.01
<b>V6T1</b>	1.12 ± 0.08	4.13 ± 0.20	0.49 ± 0.01
<b>V6T2</b>	0.47 ± 0.01	1.32 ± 0.05	0.14 ± 0.01
<b>V6T5</b>	0.35 ± 0.00	1.09 ± 0.05	0.13 ± 0.01
<b>V6T7</b>	0.27 ± 0.07	1.04 ± 0.06	0.14 ± 0.01

(\*) Ec: Módulo elástico a compresión

En la figura 4.12 están representadas a la misma escala las curvas de esfuerzo a compresión frente al desplazamiento de todos los morteros estudiados. Cualitativamente se aprecia una disminución de la pendiente posterior a la máxima tensión, lo que indica una progresiva pérdida de fragilidad a medida que aumenta la cantidad de tensoactivo para una misma cantidad de GNEU, gráficas a, b y c de la

figura 4.12, así como cuando hay un aumento de GNEU para una misma cantidad de tensoactivo, figura 4.12 parte d.

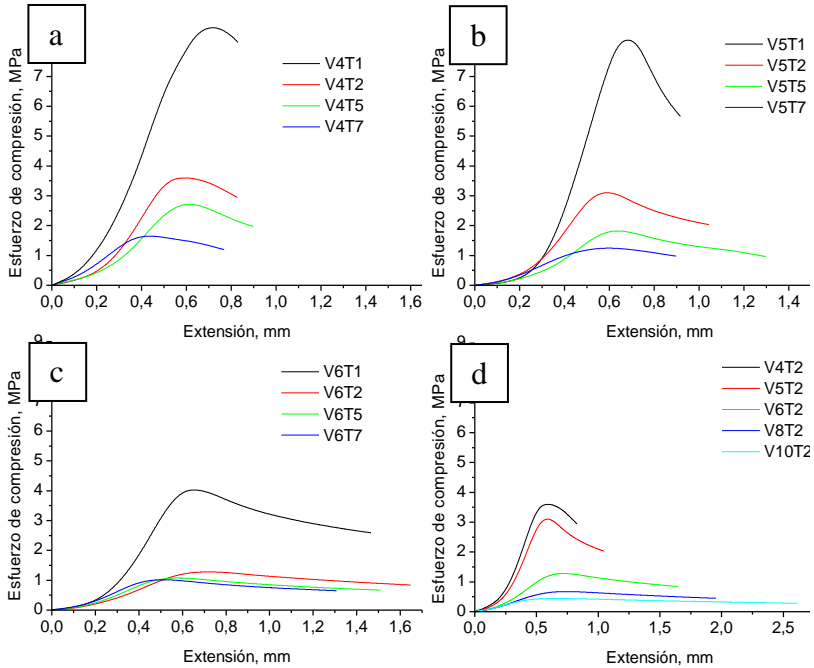


Figura 4.12. Curvas tensión-extensión.

Así mismo, se puede apreciar una disminución del módulo elástico, lo que lleva asociado una disminución de la rigidez. Por tanto, la lectura de los datos puede ser diferente y podemos concluir que aumenta la flexibilidad del mortero a través del análisis de los valores de flexibilidad a compresión, que resultan de dividir la deformación en un punto de la curva tensión-extensión (D) entre su correspondiente valor de esfuerzo (Rc).

$$C_u = \frac{D_u}{R_{Cu}} \quad (4.12)$$

En la figura 4.14 queda representado como la capacidad de deformación aumenta al aumentar el contenido de GNEU. La flexibilidad aumenta con el contenido de neumático y con la cantidad de aditivo tensoactivo, tendiendo a converger los valores de flexibilidad para la cantidad del 60% de GNEU para los mayores niveles de tensoactivo (T2, T5, T7).

Tabla 4.8. Deformación y flexibilidad última de los morteros estudiados.

Tipo	Deformación última* ( $10^{-2}$ mm/mm)	Flexibilidad última* ( $10^{-3}$ mm <sup>3</sup> /J)
V4K	2.38	3.42
V4T1	2.60	4.35
V4T2	2.44	9.99
V4T5	2.52	14.21
V4T7	1.98	17.37
V5K	2.54	4.01
V5T1	2.53	4.99
V5T2	2.87	15.03
V5T5	3.09	27.92
V5T7	2.74	34.05
V6K	2.95	8.55
V6T1	3.95	16.00
V6T2	4.51	56.84
V6T5	4.00	61.52
V6T7	3.63	58.75

(\*) Última, al 60% de la carga máxima a compresión.

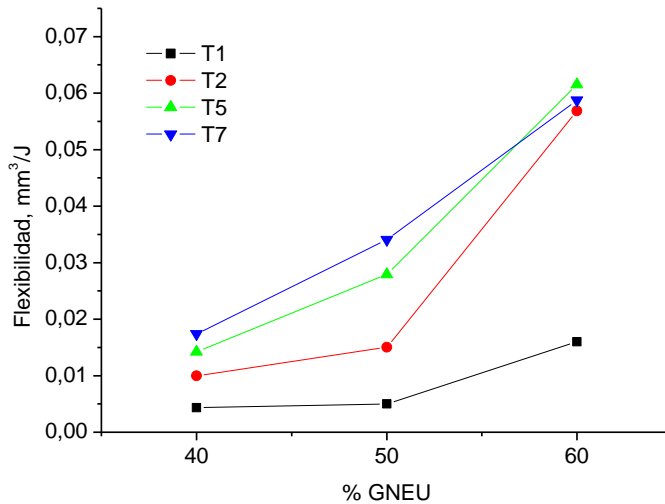


Figura 4.14. Valores de flexibilidad al 60% de la carga máxima en función del contenido de GNEU.



Figura 4.15. Superficie de fractura de los morteros V4T2 (izquierda) y V4T5 (derecha).

La pérdida de resistencia que está asociada a una pobre interfase entre la GNEU y el mortero [39], se acentúa con la incorporación de aditivo tensoactivo. En las fotografías de la figura 4.15 se advierte la menor presencia de partículas de caucho en la superficie de fractura del espécimen V4T5. Esto es debido a que la mayor cantidad de tensoactivo provoca:

- Un aumento del volumen de la pasta, con lo que la proporción fase dispersa/matriz disminuye a pesar de tener la misma proporción en la dosificación.
- Una mayor pérdida de adherencia de las partículas debido a la mayor incorporación de aire.

El factor de reducción de resistencia, SRF propuesto por Khatib & Bayomy expresa la reducción de resistencia correspondiente a cada nivel de sustitución de árido silíceo por GNEU [15]. De esta forma, podemos ver en la figura 4.16 la reducción de resistencia para los cuatro niveles de incorporación de aditivo estudiados respecto al mortero control MS a través de dicho modelo dado por la siguiente expresión:

$$SRF = a + b(1 - R)^m \quad (4.13)$$

Donde  $R$  es el contenido de GNEU en tanto por uno y  $a$ ,  $b$  y  $m$  son coeficientes de ajuste, cuyos valores quedan recogidos en la tabla 4.8. El coeficiente  $m$ , el cual expresa el grado de curvatura de la función y es un indicador sensible a los cambios del material, aumenta su valor a medida que la cantidad de aditivo es mayor. Así, vemos que para un contenido dado de GNEU el detrimento de resistencia será mayor cuanto mayor sea la cantidad de aditivo incorporado.

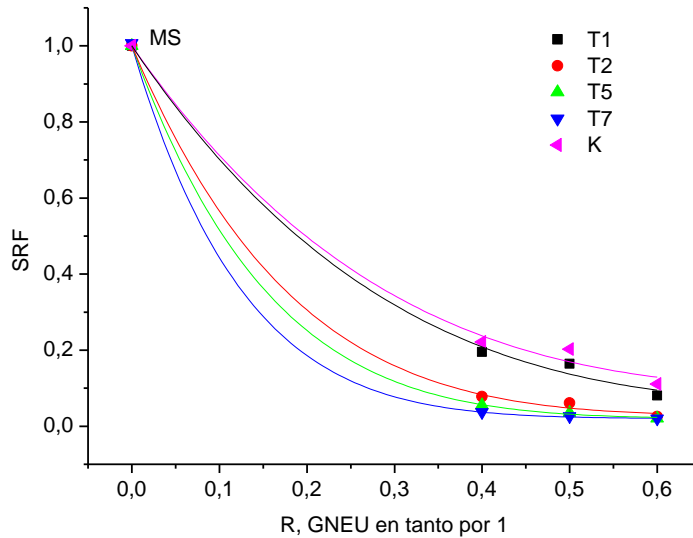


Figura 4.16. Factor de reducción de resistencia respecto al mortero control MS.

Tabla 4.8. Parámetros de ajuste del modelo respecto los morteros MS y respecto los morteros V4K, V5K y V6K.

Referencia		a	b	m	R <sup>2</sup>
MS	K	0.10	0.90	3.64	0.99
	T1	0.06	0.93	3.62	0.99
	T2	0.03	0.97	5.62	0.99
	T5	0.02	0.98	6.47	0.99
	T7	0.02	0.98	7.97	0.99

Por otra parte, el índice de continuidad  $Cl_v$ , también sensible a las variaciones que se producen en el material respecto al mortero control MS, guarda buena correlación con la resistencia a compresión, siendo un indicador fiel de la cantidad de discontinuidades en el material [40,48]. El valor del índice de continuidad propuesto,  $Cl_f$  y la densidad aparente en seco siguen la misma ley de comportamiento, como se aprecia en la figura 4.16.

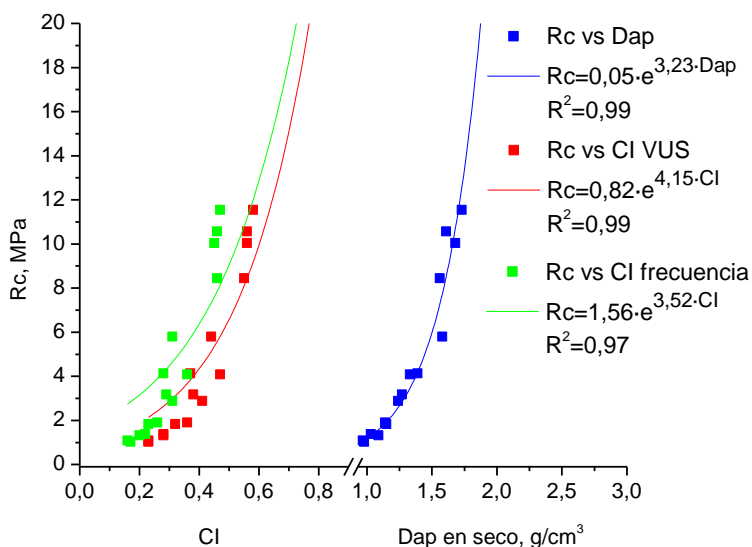


Figura 4.16. Resistencia a compresión frente al índice de continuidad de Gorisse, al de continuidad en frecuencia y a la densidad aparente en seco.

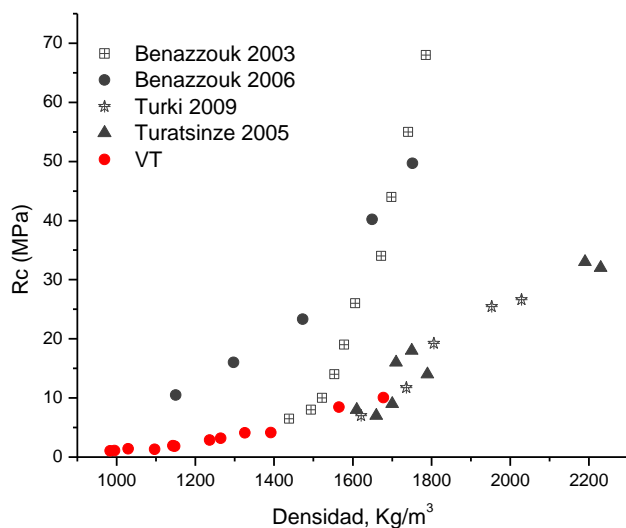


Figura 4.17. Resistencia a compresión a 28 días frente a densidad [24,36,40,49].

La resistencia a compresión obtenida es menor comparada con las halladas por otros autores, así como también se han alcanzado densidades aparentes en seco menores, como queda patente en la figura 4.17. El intervalo de resistencias a compresión de la terna de muestras con incorporación de aditivo tensoactivo estudiada varía entre 10.04 y 1.03 MPa, lo que relega la aplicación de estos morteros principalmente a aplicaciones no estructurales.

Tabla 4.10. Clasificación funcional RILEM de hormigones ligeros [50]

Clase	I	II	III
Tipo de hormigón	Construcción	Construcción y aislamiento	Aislamiento
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	< 2000	No precisada	No precisada
Resistencia a compresión (MPa)	> 15.0	> 3.5	> 0.5
Coefficiente de conductividad térmica (W/mK)	--	< 0.75	< 0.3

Sin embargo, la resistencia mínima requerida para piezas de obra de fábrica es de 2.5 MPa en las de arcilla cocida y 5.0 MPa para las silicocalcáreas (EN 771-1 y EN 771-2). Esta consideración habilita a los morteros de la serie T1 y el V4T2, V4T5 y V5T2 para la realización de piezas prefabricadas y su aplicación como piezas de obra de fábrica. Además, el documento RILEM LC2 [50], clasifica funcionalmente los hormigones ligeros en función de su densidad y su resistencia a compresión. A partir de esta categorización podemos clasificar nuestros morteros como de clase II y III. Con todo, la clasificación de los morteros de este estudio queda representada en la figura 4.18.



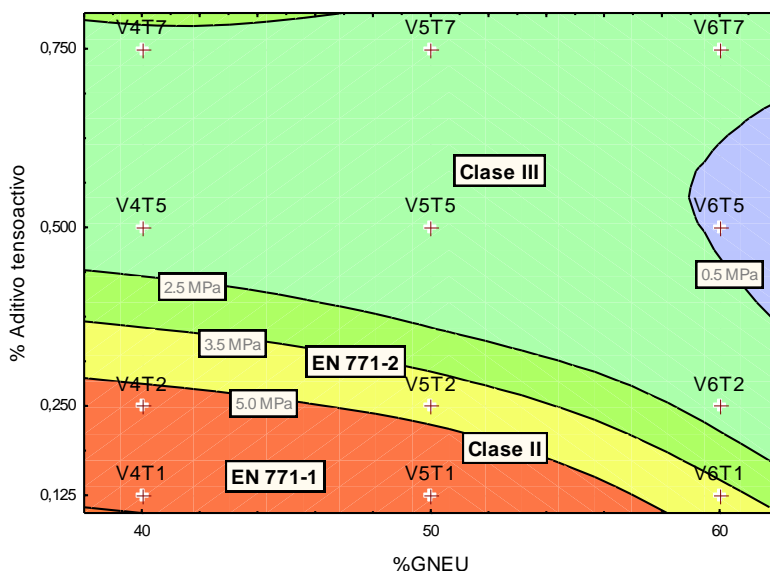


Figura 4.18. Superficie de respuesta de los valores de compresión y clasificación de morteros EN 771 y RILEM LC2.

#### 4.5 Conductividad térmica

Se han seleccionado las dosificaciones V4T5, V5T5, V6T5 para elaborar placas de 400x400x20 mm<sup>3</sup> y se han extraído de cada una de ellas 4 placas de 150x150x20 mm<sup>3</sup> (A, B, C, D). Se han ensayado por pares obteniendo dos lecturas por par de placas de una muestra. Dos pares por dos lecturas cada par, 4 lecturas de conductividad térmica que se expresan en la tabla 4.11:

Tabla 4.11. Valores de conductividad térmica obtenidos en el ensayo de hilo caliente.

Muestra	AB	AB	CD	CD	λ (W / mK)
V4T5	0.462	0.420	0.425	0.466	0.443 ± 0.024
V5T5	0.367	0.365	0.345	0.347	0.356 ± 0.012
V6T5	0.249	0.251	0.252	0.267	0.255 ± 0.008

Como el medio de compactación es diferente al realizado para las probetas de 40x40x160 mm<sup>3</sup> se vuelve a obtener la densidad aparente en seco. Podemos observar como 1 minuto de compactación en mesa vibratoria es suficiente para obtener resultados similares a 60 golpes de compactación en una capa.

Tabla 4.12. Densidad aparente en seco con distintos métodos de compactación.

Muestra	PLACAS	PRISMAS
	$D_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )
V4T5	1.21 ± 0.01	1.24 ± 0.02
V5T5	1.13 ± 0.02	1.15 ± 0.02
V6T5	1.04 ± 0.10	0.96 ± 0.02

Los resultados del ensayo mediante la técnica de hilo caliente demuestran que la conductividad térmica disminuye al aumentar el contenido de GNEU. La incorporación de partículas de caucho en la composición de los morteros y hormigones reduce la conductividad térmica del material a medida que la cantidad de partículas de caucho aumenta en su composición. Esto es debido a la diferencia de conductividad entre el árido silíceo, de 2.45 a 5.20 W/mK, y la GNEU, que varía de 0.25 a 0.50 W/mK. No obstante la conductividad térmica del material no depende exclusivamente de la conductividad de sus constituyentes, sino también de su red de poros, del contenido de humedad, del grado de cristalización, de su estructura celular, etc. [28,51].

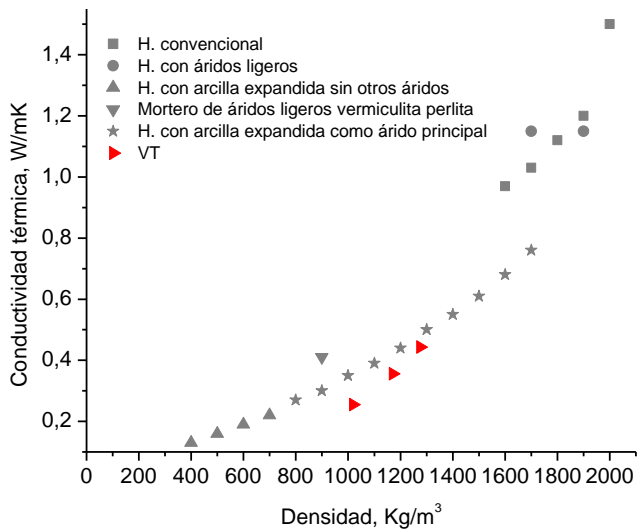


Figura 4.20. Comparación de la conductividad térmica frente a la densidad de diversos morteros y hormigones. Fuente: aplicación informática LIDER [52].

Las conductividades térmicas obtenidas son equiparables a productos comerciales empleados actualmente. En la figura 4.20 se representa

la conductividad térmica de diversos hormigones y morteros recogidos en la base de datos de materiales de construcción del programa LIDER [52]. Los compuestos estudiados muestran una conductividad térmica menor para un mismo valor de densidad que hormigones con arcilla expandida como árido principal. Además, la conductividad térmica obtenida es menor a las determinadas en otros estudios que también emplean subproductos procedentes de neumáticos fuera de uso como agregados en morteros y hormigones, como puede apreciarse en la figura 4.21 y la tabla 4.15.

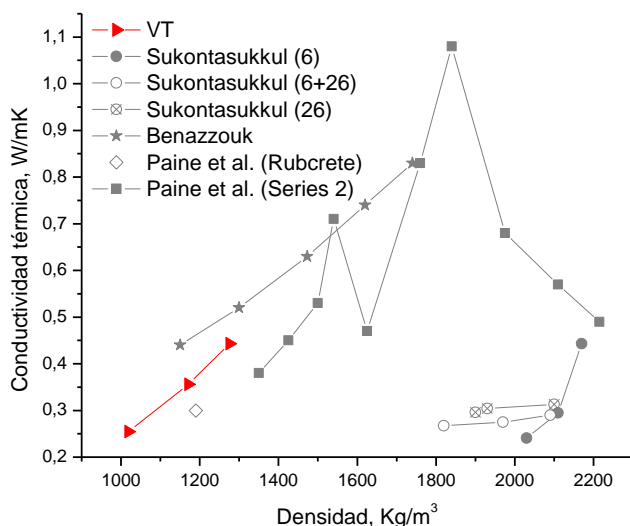


Figura 4.21. Conductividad térmica y densidad de morteros y hormigones [26,27,29]

Tabla 4.15. Conductividades térmicas determinada por otros autores.

Autor	Espécimen	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	Tipo
Paine et al. [25]	Rubcrete	1190	0.300	Hormigón
Sukontasukul [24]	6CR30	2030	0.241	Hormigón
Bennazouket al.[27]	50%	1150	0.470	Mortero

La distribución granulométrica influye en la conductividad térmica, efecto en el que no se ha hecho énfasis en los estudios realizados hasta el momento. Al respecto, existen distintas tendencias en función de la distribución granulométrica del agregado empleado, según se percibe en la figura 4.21. En tanto la distribución granulométrica incide en la red de poros del compuesto, así se verá influida la conductividad térmica. Salvo los estudios de Paine [27], el resto de

trabajos presentan tendencias similares. Puede ser debido al método de sustitución de árido empleado ya que sustituye tanto la fracción gruesa como la fina, a diferencia de Sukontasukkul [26] que solo sustituye el árido fino por dos granulometrías diferentes de granza de neumático. Siguiendo los modelos utilizados por otros autores para correlacionar la densidad frente a la conductividad térmica [29], obtenemos para lo resultados obtenidos con un  $R^2=0.99$ :

$$\lambda = 0.0285 \cdot e^{(0.00215 \cdot \rho)} \quad (4.14)$$

Con el fin de reducir el consumo energético en edificios se precisan materiales con baja conductividad térmica. Este material puede ayudar a disminuir el coeficiente de transmisión térmica U en diversas aplicaciones constructivas no estructurales de los edificios. Para reflejar este efecto se expone a continuación un ejemplo de aplicación en una azotea invertida, figura 4.19, donde el aislante se coloca en la capa exterior y sirve de protección a la impermeabilización asegurando mayor durabilidad de esta, con protección pesada y formación de pendientes.

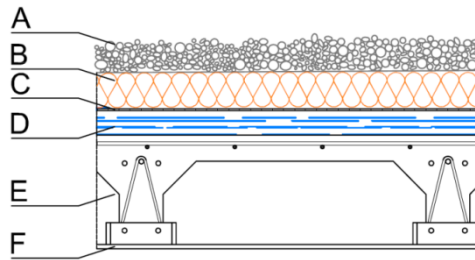


Figura 4.19. Azotea invertida no transitable con protección pesada.

Tabla 4.13. Transmisión térmica para la capa de formación de pendientes V6T5.

Capa	e (m)	$\lambda$ (W/mk)	$R_t$ ( $m^2k/W$ )
<b>A</b> Grava	0.050	2.000	0.03
<b>B</b> Aislante PS	0.030	0.034	0.88
<b>C</b> Impermeabilización	0.005	0.700	0.01
<b>D</b> V6T5	0.100	0.250	0.40
<b>E</b> Forjado bovedilla de EPS	0.300	0.500	0.60
<b>F</b> Enlucido de yeso	0.015	0.350	0.04
<b>Transmisión térmica U</b>	0.47 W/m <sup>2</sup> K		

Tras el cálculo de la transmisión térmica U de la azotea, siguiendo el procedimiento descrito en la norma EN-6946, obtenemos un valor del

coeficiente U de  $0.47 \text{ W/m}^2\text{K}$  teniendo en cuenta los espesores de la tabla 4.13. En la tabla 4.14 están expuestos la serie de hormigones adecuadas para la formación de pendientes en la azotea que contempla el programa informático LIDER, el cual es una herramienta informática diseñada para justificar el cumplimiento del Documento Básico de ahorro de energía DB HE-1 [53]. Empleando hormigones con los que obtenemos un coeficiente U de  $0.56 \text{ W/m}^2\text{K}$  en la tabla 4.14, haría falta un centímetro más de aislante de poliestireno, capa B, para alcanzar el mismo coeficiente de transmisión térmica cuando empleamos V6T5,  $0.47 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Tabla 4.14. Resistencias térmicas de la azotea de la figura para varios hormigones en la capa de formación de pendientes, capa D.

Tipo	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/mK)	U (W/m <sup>2</sup> k)
<b>Hormigón convencional</b>	2000	1.50	0.57
	1900	1.20	0.56
	1800	1.12	0.56
	1700	1.03	0.56
	1600	0.97	0.56
<b>Hormigón con áridos ligeros</b>	1800-2000	1.35	0.56
	1600-1800	1.15	0.56
<b>Hormigón con arcilla expandida sin otros áridos</b>	700	0.22	0.46
	600	0.19	0.45
	500	0.16	0.43
	400	0.13	0.41
<b>Mortero de áridos ligeros</b>	900	0.41	0.52
<b>Hormigón con arcilla expandida como árido principal</b>	1700	0.76	0.55
	1600	0.68	0.54
	1500	0.61	0.54
	1400	0.55	0.53
	1300	0.50	0.53
	1200	0.44	0.52
	1100	0.39	0.51
	1000	0.35	0.50
	900	0.30	0.49
800	0.27	0.48	

Fuente: Base de datos del programa informático LIDER [52]

## 4.6 Microestructura

Hasta el momento, pocos estudios se han llevado a cabo sobre la microestructura de morteros y hormigones que incorporan caucho como agregado, salvo los estudios realizados para verificar si tratamientos realizados a los agregados de caucho, en aras de mejorar la adherencia entre la fase dispersa y la matriz, causan algún cambio en la superficie de agregados de caucho.

Los estudios realizados por Turki et al. revelan proporciones de productos de hidratación diferentes en morteros convencionales y con caucho. Además, señala que existe al menos dos tipos de porosidad, la asociada a la matriz y alrededor de las partículas de caucho. Por otra parte, apunta que la naturaleza de los productos de hidratación en la interfase es distinta [40].

En hormigones autocompactables cabe mencionar el trabajo realizado por Bignozzi et al. donde la alta fluidez y cantidad de finos como requisito de estos hormigones favorecen la adherencia de las partículas de caucho con la matriz. Las observaciones por microscopía electrónica de barrido revelan una adherencia aceptable [34]

En el presente estudio se han seleccionado los morteros V4T1 y V4T7, con alto y bajo contenido de aditivo respectivamente. En las figuras 4.20 y 4.21 se aprecian las huellas de los poros en la matriz como consecuencia de la incorporación de aire por parte del aditivo. Se puede observar que los tamaños de las huellas de los poros en la matriz son mayores en la muestra con mayor cantidad de tensoactivo; alrededor de 300-400  $\mu\text{m}$  en V4T7 y aproximadamente la mitad en V4T1.

En las figuras 4.22 y 4.23 se revela la interfase entre la matriz y el GNEU. La diferencia de tamaño es evidente, es mayor cuando el nivel de tensoactivo es también mayor. Además se aprecia que la naturaleza de los productos de hidratación es distinta. La presencia de etringita, con forma acicular, es preferentemente mayor en la zona de la interfase y en las oquedades causadas por la inclusión de aire.

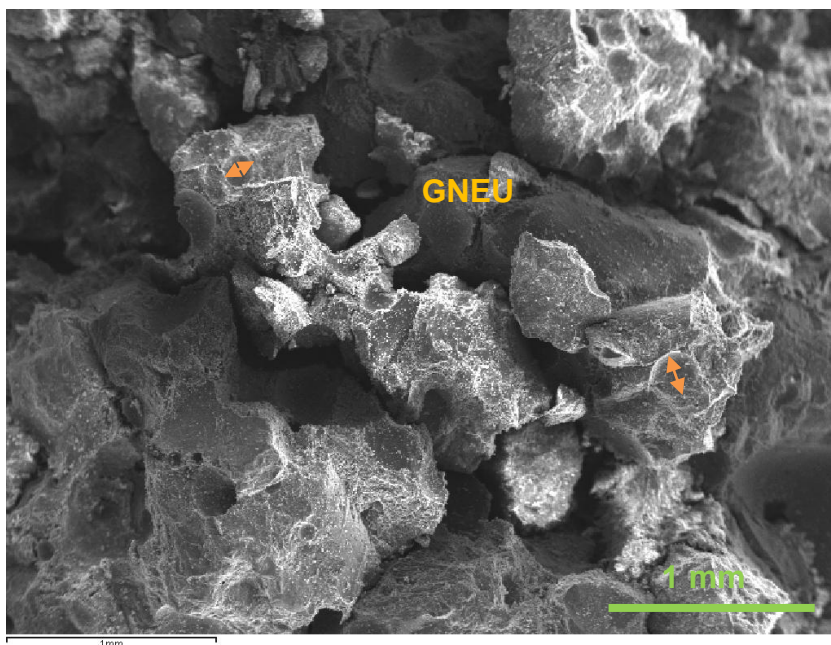


Figura 4.20. Micrografía SEM mortero V4T1. 20x

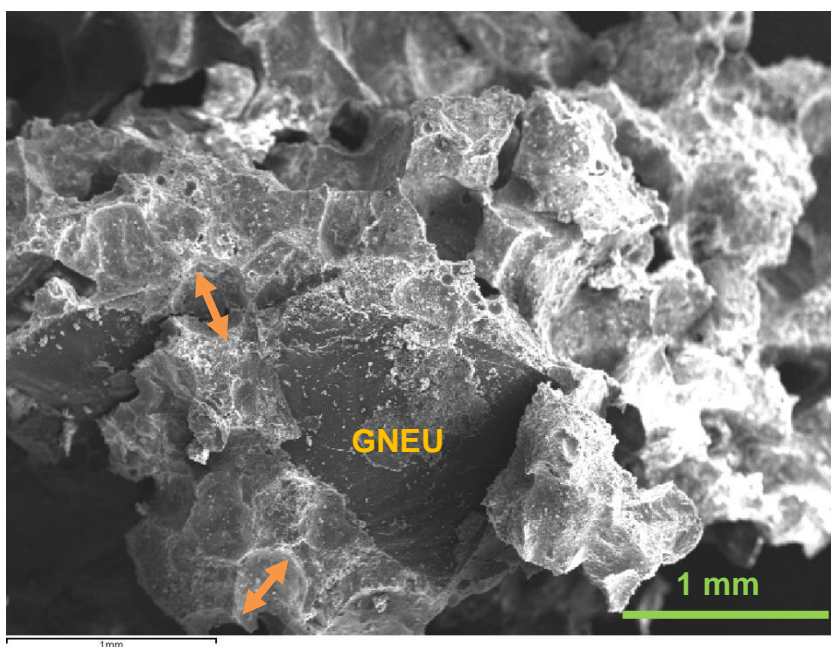


Figura 4.21. Micrografía SEM mortero V4T7. 20x

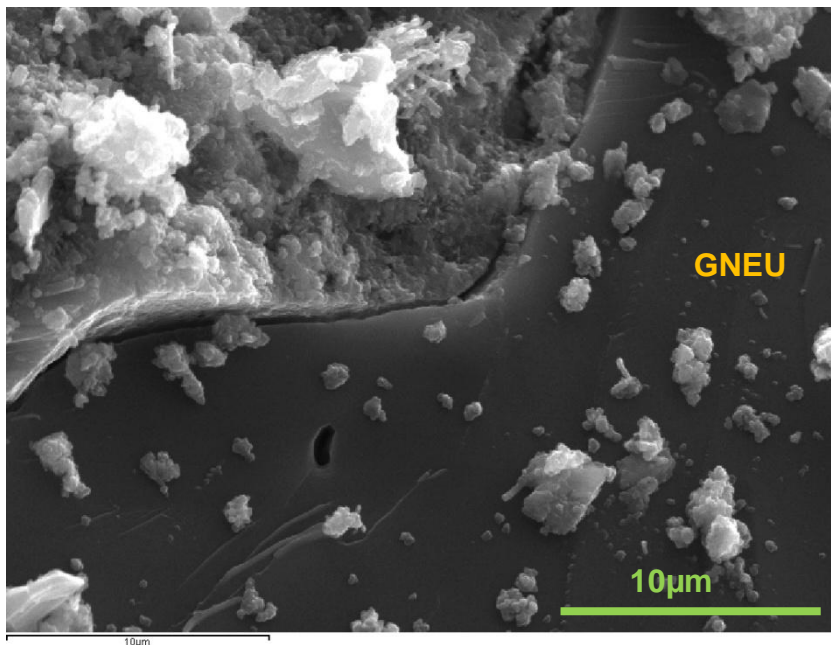


Figura 4.22. Micrografía SEM mortero V4T1. 2500x

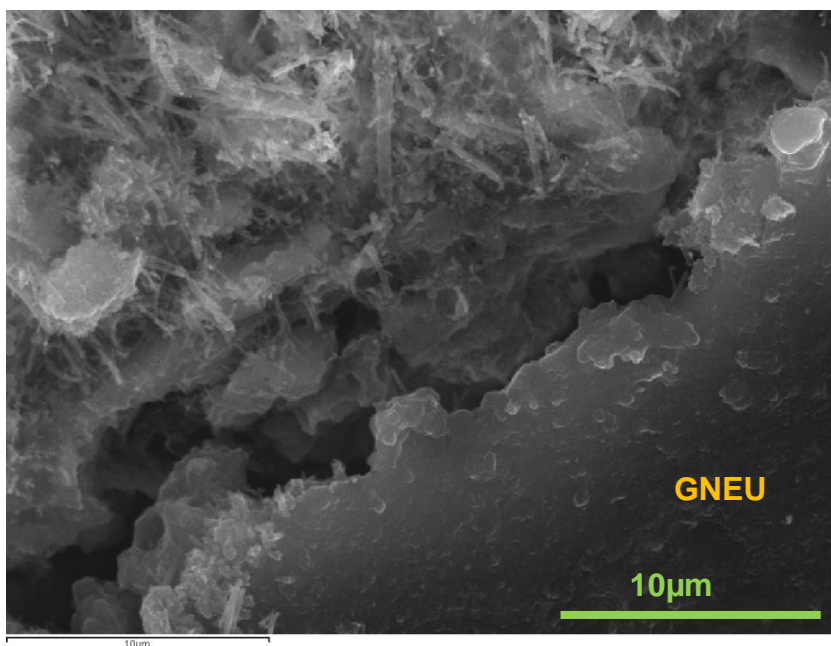


Figura 4.23. Micrografía SEM mortero V4T7. 2500x



## 5. Conclusiones

Es factible obtener morteros trabajables con grandes porcentajes de sustitución, entre 40 y 60%, de árido silíceo por GNEU, cuando se aditiva tensoactivo. La cantidad mínima de aditivo tensoactivo para obtener morteros clasificados como plásticos según EN 1015-6 es 0.25% en peso de cemento. No obstante los valores de escurrimiento en la mesa de sacudidas alcanzan valores próximos a los morteros clasificados como fluidos (200 mm) cuando la cantidad de aditivo es de 0.75%. .

El modelo de Belehradek aplicado a determinar la eficacia del aditivo servirá como base en futuras investigaciones para determinar el efecto de diferentes aditivos sobre la trabajabilidad, a través del valor de curvatura y de la posición de la asíntota vertical.

La densidad aparente en seco está entre 0.96 y 1.72 g/cm<sup>3</sup>. Se han alcanzado valores de densidad aparente en seco menores que en otros estudios que emplean residuos de NFU en morteros y hormigones [24-27], incluso cuando también incorporan aditivos aireantes [49]. El rango de densidad de los morteros de este estudio, es coincidente con el rango de densidad del hormigón con arcilla expandida como árido principal contemplado en la base de datos del programa informático LIDER [52].

La absorción de agua en porcentaje de los morteros que incorporan caucho es superior a morteros convencionales con árido silíceo. El aumento de la dosificación de aditivo tensoactivo aumenta la capacidad de absorción, tanto más cuando la cantidad de GNEU es mayor.

Los estudios de velocidad de ultrasonidos y frecuencia fundamental de resonancia a flexión del material nos revelan la capacidad para atenuar sonido y en consecuencia reducir intensidad sonora a través de él. Los valores de decremento logarítmico anuncian mayor capacidad de disipar la energía de las vibraciones a través del material a medida que aumenta la incorporación de aire.

Por otra parte, a partir de la extracción de parámetros como los índices de continuidad en velocidad de ultrasonidos y en frecuencia se han establecido modelos para predecir la densidad aparente en seco y la resistencia a compresión de los morteros estudiados. A modo de resumen, se representan en la tabla 5.1 las ecuaciones que relacionan propiedades estudiadas en este trabajo.

Tabla 5.1. Ecuaciones de ajuste que relacionan las variables  $D_{ap}$ ,  $Cl_v$ ,  $Cl_f$  y  $R_c$ .

	$D_{ap}$	$Cl_v$	$Cl_f$	$R_c$
$D_{ap}$	--	$=1.66 \cdot (Cl_v + 0.39)$ $R^2=0.91$	$=1.51 \cdot (Cl_f + 0.56)$ $R^2=0.84$	$=1.04 - 0.81 \cdot 0.95^{R_c}$ $R^2=0.96$
$Cl_v$	$=0.55 \cdot (D_{ap} - 0.57)$ $R^2=0.91$	--	$=0.93 \cdot (Cl_f + 0.12)$ $R^2=0.98$	$=1.16 - 0.99 \cdot 0.97^{R_c}$ $R^2=0.98$
$Cl_f$	$=0.56 \cdot (D_{ap} - 0.74)$ $R^2=0.84$	$=1.05 \cdot (Cl_v - 0.10)$ $R^2=0.98$	--	$=2.15 - 1.24 \cdot 0.91^{R_c}$ $R^2=0.97$
$R_c$	$=0.05 \cdot e^{3.23 \cdot D_{ap}}$ $R^2=0.99$	$=0.82 \cdot e^{4.15 \cdot Cl_v}$ $R^2=0.99$	$=1.56 \cdot e^{3.52 \cdot Cl_f}$ $R^2=0.97$	--

Las resistencias a compresión de la terna de morteros con incorporación de aire están entre 1.03 y 10.04 MPa. Obtenemos morteros clasificados como tipo II y III según la clasificación funcional de hormigones ligeros RILEM y se alcanzan las resistencias a compresión mínimas requeridas para piezas de fábrica silicocalceas y de arcilla cocida (EN 771-1, EN 771-2).

La conductividad térmica ha sido determinada mediante la técnica de hilo caliente sobre los morteros V4T5, V5T5 y V6T5. Los resultados obtenidos demuestran que el aumento de GNEU en la dosificación disminuye la conductividad térmica de los morteros, alcanzando valores de conductividad menores que hormigones convencionales y similares a productos actualmente implantados en el mercado como el hormigón con arcilla expandida.

Aunque este material queda relegado a aplicaciones no estructurales, presenta beneficios tanto medioambientales como económicos. Al tratarse de un residuo obtenemos una materia prima secundaria con valor añadido, disminuimos el impacto de acumularlo en escombreras y vertederos, y puede proporcionar un ahorro energético debido a su baja conductividad térmica cuando es empleado en diversas tipologías constructivas como aislante térmico.

Dadas las propiedades del material objeto de este estudio su aplicación es adecuada en diversas tipologías constructivas como aislante térmico, acústico y anti-impacto. Los morteros con resistencia superior a 2.5 MPa pueden, además de ser utilizados como piezas de obra de fábrica, proporcionar las características adicionales mencionadas. No obstante, es necesaria mayor investigación para el desarrollo de este material.

## 6. Propuestas de investigación

Ante los prometedores resultados obtenidos en este estudio, se propone para estudios posteriores evaluar nuevas variables tales como:

1. Estudiar la eficacia de otros aditivos tensoactivos y diferentes métodos de amasado.
2. Bajar el estándar de resistencia del cemento. El uso de un cemento con un estándar de resistencia inferior no influye prácticamente en el desempeño mecánico del material como puede apreciarse en la tabla 6.1. Incluso para una misma resistencia mecánica es previsible obtener conductividad térmica inferior.

Tabla 6.1. Comparación de propiedades al disminuir el estándar de resistencia del cemento.

V5T5	Cemento	$D_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$Cl_v$	$R_c$ (MPa)
	<b>CEM I 52.5 R</b>	$1.15 \pm 0.02$	0.32	$1.84 \pm 0.07$
<b>CEM I 42.5 R</b>	$1.16 \pm 0.01$	0.31	$1.80 \pm 0.07$	

3. Incorporar, en la dosificación, puzolanas activas como la ceniza volante procedente de central termoeléctrica. La adición de puzolanas como la ceniza volante puede aumentar la resistencia mecánica a largo plazo y además, al tratarse de un material con una morfología celular puede mejorar el comportamiento de la conductividad térmica.
4. Realizar ensayos de impedancia acústica y evaluar la posibilidad de elaborar paneles tipo sándwich donde la sección resistente sea desempeñada por morteros u hormigones reforzados con fibras, destinados a paneles prefabricados de fachada o como barreras acústicas en carreteras.
5. Aumentar el porcentaje de sustitución de árido silíceo por GNEU. Al respecto se han realizado morteros. V8K, V8T2, V10T2, siguiendo la nomenclatura de este estudio, corresponden a los niveles de sustitución de árido por GNEU de 80 y 100% y de aditivo tensoactivo de 0.25 y 0.75%. Las propiedades evaluadas pueden observarse en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Propiedades de los morteros cono 80 y 100% de GNEU en volumen

Tipo	E (mm)	$D_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Abs (%)	Rc (MPa)	$Cl_v$
V8T2	194 ± 1	0.86 ± 0.01	45.64	0.69 ± 0.02	0.19
V8T7	197 ± 1	0.73 ± 0.01	62.11	0.47 ± 0.03	0.19
V10T2	192 ± 3	0.75 ± 0.01	51.88	0.45 ± 0.01	0.17
V10T7	197 ± 1	0.64 ± 0.01	68.06	0.30 ± 0.13	0.16

- Estudiar el comportamiento de otros subproductos de NFU. Aunque Najim & Hall recomiendan evitar el uso de las granulometrías mayores y el polvo de caucho en favor de la granza de neumático por motivos de reducción de resistencia y costo [54], el uso de fibras puede mejorar la resistencia a flexión.

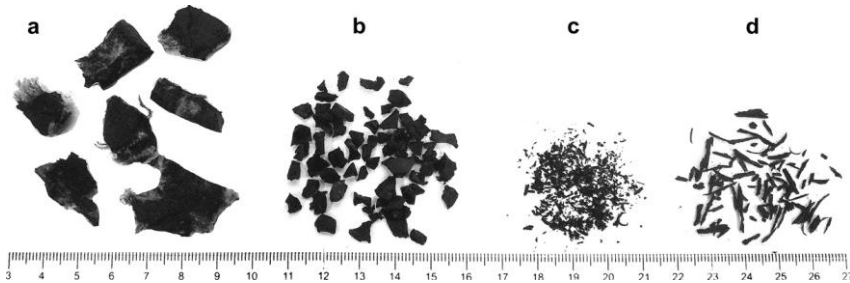


Figura 6.1. Clasificación de subproductos de NFU. Chip, granza, polvo y fibra. Fuente: Najim & Hall [54].

- Ensayar la resistencia al fuego y obtener la clasificación de reacción al fuego de los productos de construcción según RD 312/2005 [55]. Sólo se ha realizado un ensayo no normalizado en el que se planifica: Altura de llama, tiempo de exposición, altura de la probeta, y presión del gas. Las observaciones realizadas son: No existen focos que se propaguen, cualquier llama persistente se autoextingue en pocos segundos, no existe desprendimiento de partículas incandescentes.

## 7. Bibliografía

- [1] Unión Europea. Directiva 1999/31/CE de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 16 de julio del 1999, núm. L182, p. 1-19
- [2] España. Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. *Boletín Oficial del Estado*, 29 de enero de 2002, núm. 25, p. 3507-3521.
- [3] Unión Europea. Directiva 2000/53/CE de 18 de septiembre de 2000 relativa a los vehículos al final de su vida útil. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 21 de octubre de 2000, núm. L269, p. 34-42
- [4] España. Resolución de 8 de octubre de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 5 de octubre de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso, 2001-2006. *Boletín Oficial del Estado*, 30 de Octubre de 2001, num. 260, p. 39547-39555.
- [5] España. Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso. *Boletín Oficial del Estado*, 3 de Enero de 2006, núm. 2, p. 352-357
- [6] Unión Europea. Directiva 2006/12/CE, de 12 de abril de 2006, relativa a los residuos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, núm. L114 p. 9-21.
- [7] España. Ley 10/1998, de 21 de Abril, de Residuos, *Boletín Oficial del Estado*, 22 de Abril de 1998, num. 96, p. 13372-13384.
- [8] Batayneh, M., Marie, I. & Asi, I., 2007. Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27(12), p.1870-1876.
- [9] España. Ministerio de medio ambiente. II Plan nacional de neumáticos fuera de uso 2008-2015. Versión preliminar. Anexo 4 Plan nacional integrado de residuos (PNIR) 2008-2015 [en línea] p. 343-365. Disponible en: [http://www.mma.es/secciones/calidad\\_contaminacion/residuo](http://www.mma.es/secciones/calidad_contaminacion/residuo)

s/planificacion\_residuos/pdf/borradorpnir\_anexo4.pdf  
[Consulta: 29 de noviembre de 2010]

- [10] Eldin N.N., Senouci A.B., 1993. Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5, p. 478-496
- [11] Limbachiya, M.C. & Roberts, J.J. (eds.), 2004. *Sustainable waste management and recycling: used/ post-consumer tyres: proceedings of the international conference organised by the Concrete and Masonry Research Group and held at Kingston University. London on 14-15 September 2004*, Thomas Telford.
- [12] Raghavan D., Huynh H., Ferraris C.F., 1998. Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber filled cementitious composite. *Journal of Materials Science*. p. 1745-1752.
- [13] Akasaki J.L. et al., 2004. Mortar added by tyre rubber residues: Characterisation in fresh and hardened state. En: *Sustainable waste management and recycling: used/ post-consumer tyres: proceedings of the international conference organised by the Concrete and Masonry Research Group and held at Kingston University. London 14-15 September 2004*. Limbachiya, M.C. & Roberts, J.J. (eds.), 2004. Thomas Telford, p. 179-185.
- [14] Pierce C.E., Williams R.J., 2004. Scrap tire modified concrete: Past, present, and future. En: *Sustainable waste management and recycling: used/ post-consumer tyres: proceedings of the international conference organised by the Concrete and Masonry Research Group and held at Kingston University. London 14-15 September 2004*. Limbachiya, M.C. & Roberts, J.J. (eds.), 2004. Thomas Telford, p. 1-16.
- [15] Khatib Z.K., Bayomy F.M., 1999. Rubberized Portland cement concrete. *Journal of materials in civil engineering*. Vol. 11 n°3, p. 206-213
- [16] Khaloo A.R., Dehestani M., Rahmatabadi P., 2008. Mechanical properties of concrete containing a high volumen of tire-rubber particles. *Waste Management*, 28, p. 2472-2482.
- [17] Fattuhi, N.I. & Clark, L.A., 1996. Cement-based materials

- containing shredded scrap truck tyre rubber. *Construction and Building Materials*, 10(4), p. 229-236.
- [18] Turatsinze A, Bonnet S., Granju J.L., 2007. Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: Improvement of in cracking shrinkage resistance. *Construction and Building Materials*, 21, p.176-181.
- [19] Rostami, H., Zandi, I., Silverstrim, T., 1993. Recycling of Waste Tire in Concrete. *Concrete 2000 International Conference on Concrete Technology*, Dundee, Scotland, p. 391-399.
- [20] Segre N., Joekes I., 2000. Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research*, 30, p. 1421-1425.
- [21] Albano C. et al., Influence of scrap rubber addition to Pórtland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing. *Composite Structures*, 71, p. 439-446.
- [22] Li G. et al., 2004. Development of waste tire modified concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, p. 2283-2289.
- [23] Topçu, I.B. & Avcular, N., 1997. Analysis of rubberized concrete as a composite material. *Cement and Concrete Research*, 27(8), p. 1135-1139.
- [24] Benazzouk A. et al., 2003. Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), p. 711-720.
- [25] Benazzouk A. et al., 2007. Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes. *Cement and Concrete Composites*, 29, p. 732-740. Albano
- [26] Sukkontasukkul P., 2009. Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. *Construction and Building Materials*, 23, p. 1084-1092.
- [27] Paine K.A., Moroney R.C., Dhir R.K., Application of granulated rubber to improve thermal efficiency of concrete. En: *Sustainable waste management and recycling: used/post-consumer tyres: proceedings of the international*

- conference organised by the Concrete and Masonry Research Group and held at Kingston University. London 14-15 September 2004.* Limbachiya, M.C. & Roberts, J.J. (eds.), 2004. Thomas Telford, p. 179-185.
- [28] Laidoudi B., Marmoret L., Quéneudec M., 2004. Reuse of rubber waste in cementitious composites: Hygrothermal behaviour. En: *Sustainable waste management and recycling: used/ post-consumer tyres: proceedings of the international conference organised by the Concrete and Masonry Research Group and held at Kingston University. London 14-15 September 2004.* Limbachiya, M.C. & Roberts, J.J. (eds.), 2004. Thomas Telford, p. 171-178.
- [29] Benazzouk A. et al., 2008. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling. *Construction and Building materials*, 22, p. 573-579.
- [30] Hernández-Olivares F., Barluenga G., 2004. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), p.109-117.
- [31] Cano E., Cerezo L., Urbino M., *Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso. Informe de vigilancia tecnológica* [en línea]. Madrid: Fundación CEIM; Comunidad de Madrid. Dirección General de Universidades e Investigación, 2007 (VT-10). Disponible en: [www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT10\\_valorizacion-energetica-neumaticos.pdf](http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT10_valorizacion-energetica-neumaticos.pdf), [Consulta: 16 de Enero de 2009].
- [32] Correia, S.L. et al., 2010. Factorial design used to model the compressive strength of mortars containing recycled rubber. *Composite Structures*, 92(9), p. 2047-2051.
- [33] Del Rio Merino M., Santa Cruz Astorqui J., González Cortina M., 2007. Viability analysis and constructive applications of lightened mortar (rubber cement mortar). *Construction and Building Materials*, 21 , p. 1785-1791
- [34] Bignozzi M.C., Sandrolini F., 2006. Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 36, p. 735-739.



- [35] Aiello M.A., Leuzzi F., 2010. Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state. *Waste Management*, 30, p. 1696-1704.
- [36] Turatsinze, A., Bonnet, S. & Granju, J., 2005. Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. *Building and Environment*, 40(2), p.221-226.
- [37] Belehradek J., 1935. Temperature and living matter. *Protoplasma Monogr.*, 8. Borntraeger, Berlin, 277 pp.
- [38] Fedroff D., Ahmed S., Savas D.Z., 1996. Mechanical properties of concretewith ground waste tire rubber. *Transp. Res. Rec.*, 1532, p.66–72.
- [39] Siddique R., 2004. Properties of concrete containing scrap-tire rubber. An overview. *Waste Management*, 24, p. 563-569.
- [40] Turki M. et al., 2009. Microstructure, physical and mechanical properties of mortar-rubber aggregates mixtures. *Construction and Building Materials*, 23, p. 2715-2722.
- [41] Chen, J. et al., 2010. Rapid evaluation of alkali-silica reactivity of aggregates using a nonlinear resonance spectroscopy technique. *Cement and Concrete Research*, 40(6), p. 914-923.
- [42] Landau L.D., Lifshitz E.M., 1982. *Teoría de la elasticidad*. Volumen 7. Ed. Reverté.
- [43] Malhorta V.M., Carino N.J., 2004. *Handbook on nondestructive testing of concrete*, ASTM International, CRC Press.
- [44] Gorisse F., 1980. *Ensayo y control de los hormigones*. Editores técnicos asociados.
- [45] Yan L., Jenkins C.H., Pendleton R.L., 2000. Polyolefin fiber-reinforced concrete composites. Part I. Damping and frequency characteristics. *Cement and Concrete Research*, 30, p. 391-401.
- [46] Johnson P.A., Zinszner B., Rasolofosaon P.N.J., 1996. Resonance and elastic nonlinear phenomena in rock. *Journal*

- of geophysical research*. vol.101, nºB5, p. 11553-11564.
- [47] Toutanji, H.A., 1996. The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 18(2), p.135-139.
- [48] Kriker A. et al., 2005. Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. *Cement and Concrete Composites*, 27, p.554-564.
- [49] Benazzouk A. et al., 2006. Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste. *Cement and Concrete Composites*. 28, p. 650-657.
- [50] RILEM LC2.1974. Méthodes d'essais des bétons cellulaires. *Matériaux et Construction* 8(45), p.224.
- [51] Yaşar E., Erdoğan H., Güneyli H., 2008. Determination of the thermal conductivity from physico-mechanical properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, p. 219-225.
- [52] LIDER [en línea] versión 1.0 actualización 1 de Julio de 2009. Ministerio de Fomento, Secretaría de estado de vivienda y actuaciones urbanas, 2009. Disponible en: [http://www.codigotecnico.org/web/recursos/aplicaciones/contenido/texto\\_0002.html](http://www.codigotecnico.org/web/recursos/aplicaciones/contenido/texto_0002.html) [Consulta: 29 de Noviembre de 2010].
- [53] España. Ministerio de Fomento, Secretaría de Estado de vivienda y actuaciones urbanas. *Documento Básico de ahorro de energía DB HE-1: Limitación de la demanda energética. Código Técnico de la Edificación*. Abril 2009.
- [54] Najim K.B., Hall M.R., 2010. A review of the fresh/hardened properties and applications for plain (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC). *Construction and Building Materials*, 24, p. 2043-2051.
- [55] España. Real Decreto 312/2005, de 18 de marzo, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego. *Boletín Oficial del Estado*, 2 de abril de 2005, núm. 79, p. 11318-11348.