



**UNIVERSIDAD DE SEVILLA**

**GRADO EN EDIFICACIÓN**

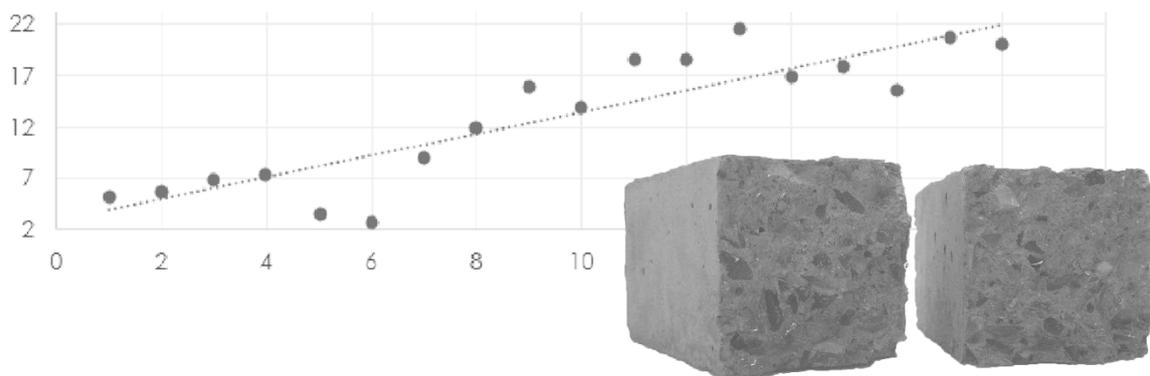
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN**



Escuela Técnica Superior de  
**Ingeniería de Edificación**

**PROYECTO FIN DE GRADO**

**VIABILIDAD DEL USO DE VIDRIO SODOCÁLCICO MOLIDO COMO  
SUSTITUTO DEL AGREGADO NATURAL EN MORTEROS.**



**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS II**

**Vicente Flores Alés**

**Víctor Jiménez Bayarri**

**2ª Convocatoria**

**2017**



**UNIVERSIDAD DE SEVILLA**

**GRADO EN EDIFICACIÓN**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN**



Escuela Técnica Superior de  
**Ingeniería de Edificación**

**PROYECTO FIN DE GRADO**

**VIABILIDAD DEL USO DE VIDRIO SODOCÁLCICO MOLIDO  
COMO SUSTITUTO DEL AGREGADO NATURAL EN  
MORTEROS.**

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS II**

**Vicente Flores Alés**

**Víctor Jiménez Bayarri**

**2ª Convocatoria**

**2017**



## Agradecimientos

Agradezco y reconozco de la forma más sincera la dedicación, enseñanza y el consejo que me ha prestado desde el primer momento hasta el último mi tutor de Proyecto Fin de Grado Vicente Flores Alés. Gracias por guiarme en este proyecto y por alentarme fuera de él excediendo tus funciones. Desde la admiración.

Gracias a Jose Manuel por ayudarme y acompañarme durante los ensayos de laboratorio, compartiendo la diversión de romper... ¡en pro de la ciencia!

Gracias al Grupo de Investigación "Materiales y Construcción" del Centro de Investigación Tecnología e Innovación de la Universidad de Sevilla que ha posibilitado los análisis del material objeto de estudio.

También quiero dar mi sincero agradecimiento a Javi y Abraham, compañeros de trabajo, esfuerzo y dedicación, pero sobre todo amigos. Sin vosotros la flecha siempre es mayor.

Gracias a mis otros compañeros, de la vida, de siempre, Dani, Naroa y Marina, por acercarme el mar cuando no lo tenía.

Y a ti, no podía faltar, por tu admiración pero sobre todo por acompañarme.

Doy las gracias especialmente a mis hermanos por la ayuda que me habéis prestado siempre en el momento justo y en el ámbito que fuere, aunque vuestra simple presencia a mí ya me arenga. Sabed que es recíproco.

Y sin duda, gracias a los auténticos imprescindibles en esta historia. Gracias por inculcarme la dedicación y la constancia base para cualquier proyecto, pero también por confiar en mí hasta en los momentos en los que ni uno mismo confía. Gracias mamá y papá.



## Resumen

La revolución industrial consigue que el vidrio (conocido desde el año 3.000 a.C.) se extienda a toda la población. En su origen, este material fue utilizado exclusivamente para albergar alimentos, y más aún cuando, posteriormente (s. XVIII), Nicolás Appert pudo solucionar los problemas de avituallamiento de las tropas de Bonaparte aplicando por primera vez la conserva mediante esterilización en vacío, técnica perfeccionada posteriormente por Pasteur (s. XIX).

Actualmente una máquina moderna de fabricación de envases de vidrio puede producir hasta 700.000 al día, luego no es de extrañar que la cantidad mundial de este residuo represente el 5% del total de residuos sólidos.

El refundido ayuda a que este número no sea mayor, y es esta la línea que dirige al presente trabajo hacia la reutilización del residuo sólido de vidrio.

Siendo el cemento el material de construcción más demandado globalmente, la conjunción de ambos vidrio y cemento supondría beneficios medioambientales así como técnicos y mecánicos. En este trabajo se evalúa la sustitución del árido natural por vidrio molido hasta una finura de 4 milímetros para su uso en morteros, demostrando una mayor durabilidad y mejor comportamiento térmico sin perjuicio de las resistencias mecánicas.

Dosificaciones del 25%, 50% y 75% fueron comparadas con una dosificación testigo para evaluar aspecto, compacidad, comportamiento mecánico y refractariedad.



## Abstract

Industrial revolution ensures that the glass (known from the 3,000 b.C.) extends to the whole population. Originally, this material was used exclusively to preserve food, even more when Nicoĺs Appert (the 18th century) solved the problems of supplying the troops of Bonaparte applying for the first time the preserve by vacuum sterilization, technique later perfected by Pasteur (19th century).

Currently, modern manufacturing machinery for making glass containers can produce up to 700,000 a day, so it is not surprising that the global amount of this waste represents 5% of total solid waste.

Reflow process helps decreasing that number, and this is the line that directs the present work towards the reuse of the solid waste glass.

As cement is the building material most demanded globally, the combination of both glass and cement would entail environmental as well as technical and mechanical benefits. This work evaluates the substitution of the natural aggregate for ground glass to a fineness of 4 millimeters for use in mortars, demonstrating a greater durability and better thermal behavior without detriment of mechanical resistance.

Replacement ratios of 25%, 50% and 75% were compared with a reference mix to evaluate appearance, compactness, mechanical behavior and refractoriness.



## I. Justificación de la elección del tema y visión personal

Mi preocupación por el medio ambiente viene desde el momento en el que comprendo que no es un ente abstracto y separado de mí, no es el parque donde mis padres me llevaban cuando era un niño ni el río que visito desde que lo conocí, tampoco es la necesidad que tengo de oler el mar cuando me alejo de él (aunque ésta última se acerca). No es sino la matriz base de nuestra realidad, del que escribe y del que lee. Siguiendo ésta dirección quise dotar de sentido a mi Proyecto Final de Grado.

*Hay placer en los bosques sin senderos,  
hay éxtasis en la costa solitaria.  
Hay compañía,  
allí donde nadie se hace presente,  
y al lado del mar profundo  
hay música en su rugido:  
No amo menos al hombre,  
sino más a la naturaleza.*  
Lord Byron.

Además, en mis primeros años en esta carrera supe que mi Trabajo Final estaría enfocado en la rama de investigación de materiales, decisión que durante este camino no he podido desafianzar y que se materializa ahora.

Es así como se define la montea previa de este trabajo, trazándose a continuación el replanteo de cimentación.

Es cierto que en la actualidad, el vidrio puede parecer uno de los residuos más inofensivos dada la alta tasa de reaprovechamiento que posee, pudiéndose reutilizar o refundir para dotarle de una vida útil más longeva. Sin embargo, este carácter en cierto modo inofensivo sólo lo tiene el vidrio sodocálcico común que conserva nuestros alimentos. Si nos referimos al vidrio que proyecta estas líneas en una pantalla Led, LCD, TFT o de tubo catódico (no hay que olvidarlas), y sobre todo si nos referimos a las toneladas de chatarra electrónica repartidas sin control por todo el globo esta cuestión se evidencia más grave.



*E-Waste o basura electrónica. Un tratamiento indebido provoca graves consecuencias para el medio y para los que se dedican a ello en condiciones precarias.*



*IZQUIERDA: Glass beach, En el siglo XX, los residentes de Fort Bragg (California) arrojaban su basura a los acantilados de Union Lumber Company. DERECHA: Golfo de Pedro el Grande, el mayor entrante del mar del Japón, en la costa del Krai de Primorie (Rusia) usado décadas antes como vertedero de camiones cargados con desechos de vidrio de una fábrica local.*

Un mortero en el que parte del cemento (850 Kcal/Kg clínker de consumo energético de la central, sin contar su posterior transporte, puesta en obra y emisiones tanto del horno como del transporte) y también parte de su árido procedente de canteras se sustituye por un residuo lavado, machacado y tamizado (operaciones ínfimamente energéticas) que es capaz de presentar propiedades puzolánicas, puede resultar una forma contundente de conservación medioambiental atendiendo sobre todo a la demanda que ha tenido siempre este material compuesto.

Si además de aptitudes mecánicas este material milenario es capaz de desarrollar capacidades refractarias y de aislamiento de ciertos tipos de radiación, mejor trabajabilidad, mayor compacidad...etc, se estará pues aumentando la amplitud de sus posibilidades en pro de un mayor reaprovechamiento del mencionado residuo.



*Muestras elaboradas para la parte experimental de este proyecto.*



## II. Índice

I. Justificación personal de la elección del tema.....	7
II. Índice.....	10
1. Introducción. Reaprovechamiento de residuos.....	13
1.1 Análisis de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU).....	13
1.1.1 Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU).....	18
1.2 Análisis de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).....	24
1.2.1 Gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).....	26
1.3 Residuo de vidrio. Análisis.....	26
1.3.1 Residuo de vidrio. Generalidades de su reciclaje.....	29
2. Objetivos.....	35
3.1 Metodología. Fuentes de búsqueda documental.....	37
3.1.1 Investigaciones.....	38
3.2 Metodología. Propiedades del mortero.....	70
3.2.1 Propiedades del mortero fresco.....	70
3.2.1.1 Absorción de agua.....	70
3.2.1.2 Trabajabilidad.....	70
3.2.1.3 Contenido de aire ocluido.....	71
3.2.2 Propiedades del mortero endurecido.....	71
3.2.2.1 Porosidad.....	71
3.2.2.2 Resistencia a compresión.....	72
3.2.2.3 Resistencia a flexión.....	72
3.2.2.4 Adherencia vidrio-cemento.....	73
3.2.2.5 Retracción.....	73
3.2.2.6 Resistencia a los ciclos de hielo-deshielo.....	73
3.2.2.7 Ataque por sulfatos.....	73
3.2.2.8 Reacción árido-álcalis.....	74
3.2.3 Procedimiento experimental.....	74
3.2.3.1 Procedencia del árido natural.....	75

3.2.3.2	Procedencia del vidrio.....	75
3.2.3.3	Dosificaciones.....	77
3.2.3.4	Comprobación de la compacidad.....	79
3.2.3.5	Comprobación de la resistencia al fuego.....	81
3.2.3.6	Ensayos de resistencia.....	81
4.	Estado de la cuestión.....	85
4.1	Análisis de la normativa.....	85
4.1.1	Granulometría.....	86
4.1.2	Densidad.....	88
4.1.3	Absorción.....	88
4.1.4	Forma y textura.....	89
4.1.5	Coefficiente de los Ángeles.....	89
4.1.6	Mortero adherido.....	90
4.1.7	Partículas blandas.....	91
4.1.8	Resistencia a ciclos hielo-deshielo.....	91
4.1.9	Partículas ligeras.....	91
4.1.10	Terrones de arcilla y otras impurezas.....	92
4.1.11	Contenido de cloruros.....	93
4.1.12	Contenido de sulfatos.....	93
4.1.13	Contenido de álcalis.....	94
5.	Análisis de los resultados.....	96
5.1.	Análisis químico del vidrio.....	96
5.2.	Características organolépticas.....	96
5.3.	Compacidad.....	98
5.3.1.	Diferencia de pesadas.....	98
5.3.2.	Ultrasonidos.....	99
5.4.	Resistencias mecánicas.....	100
5.4.1.	Resistencia a flexión.....	100
5.4.2.	Resistencia a compresión.....	101
5.5.	Estabilidad térmica.....	103
6.	Conclusiones.....	110
7.	Bibliografía.....	112



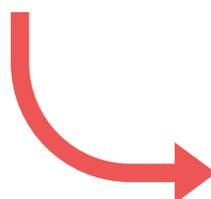
# 1. Introducción. Reaprovechamiento de residuos

## 1.1 Análisis Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

El depender energéticamente de las fuentes fósiles, junto con la generación de residuos son dos de los temas de carácter medioambiental que mayor inquietud despierta en la sociedad actual, confluyendo en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) problema sabido como especialmente relevante.

Por lo tanto, la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) es la primera casilla en el tablero del juego contra los residuos. En Europa se generaron aproximadamente 5 toneladas de residuos sólidos urbanos por persona en el presente año 2017 con una variabilidad enorme entre los distintos países como se puede observar en la siguiente tabla:

Total	Waste and scrap	Manufactures	Energy	Construction and demolition	Other economic activities
1000	1000	1000	1000	1000	1000
Belgium	1000	1000	1000	1000	1000
Bulgaria	1000	1000	1000	1000	1000
Czech Republic	1000	1000	1000	1000	1000
Denmark	1000	1000	1000	1000	1000
Germany	1000	1000	1000	1000	1000
Greece	1000	1000	1000	1000	1000
Spain	1000	1000	1000	1000	1000
France	1000	1000	1000	1000	1000
Italy	1000	1000	1000	1000	1000
Poland	1000	1000	1000	1000	1000
Portugal	1000	1000	1000	1000	1000
Romania	1000	1000	1000	1000	1000
Slovenia	1000	1000	1000	1000	1000
Slovakia	1000	1000	1000	1000	1000
Finland	1000	1000	1000	1000	1000
Sweden	1000	1000	1000	1000	1000
United Kingdom	1000	1000	1000	1000	1000
Iceland	1000	1000	1000	1000	1000
Liechtenstein	1000	1000	1000	1000	1000
Norway	1000	1000	1000	1000	1000
Montenegro	1000	1000	1000	1000	1000
FYR of Macedonia	1000	1000	1000	1000	1000
Serbia	1000	1000	1000	1000	1000
Turkey	1000	1000	1000	1000	1000
Bosnia and Herzegovina	1000	1000	1000	1000	1000
Kosovo (UNSCR 1244)	1000	1000	1000	1000	1000



	Total	
	(million tonnes)	(kg per inhabitant)
<b>EU-28</b>	<b>2 502.9</b>	<b>4 931</b>
Belgium	65.6	5 838
Bulgaria (*)	179.7	24 872
Czech Republic	23.4	2 223
Denmark	20.1	3 558
Germany	387.5	4 785
Estonia	21.8	16 587
Ireland (*)	15.2	3 285
Greece	69.8	6 404
Spain	110.5	2 378
France	324.5	4 913
Croatia (*)	3.7	879
Italy	159.1	2 617
Cyprus (*)	2.1	2 406
Latvia	2.6	1 315
Lithuania	6.2	2 114
Luxembourg	7.1	12 713
Hungary	16.7	1 688
Malta (*)	1.7	3 896
Netherlands	133.2	7 901
Austria	55.9	6 541
Poland	179.0	4 710
Portugal	14.6	1 402
Romania (*)	175.6	8 820
Slovenia	4.7	2 273
Slovakia (*)	8.9	1 636
Finland	96.0	17 572
Sweden	167.0	17 226
United Kingdom	251.0	3 885
Iceland (*)	4.5	1 651
Liechtenstein	0.6	14 919
Norway (*)	11.7	2 283
Montenegro	1.2	1 872
FYR of Macedonia	2.2	1 058
Serbia	49.1	6 890
Turkey (*)	73.1	947
Bosnia and Herzegovina (*)	0.5	1 161
Kosovo (UNSCR 1244)	1.0	574

Tabla 1: Waste Statistics: Eurostat (2017)

En España, en la actualidad se sigue optando por el enterramiento de residuos como solución (<50%), en los datos de la siguiente gráfica del pasado año 2012 esta cifra superaba el 60%, mientras que en el conjunto de la Unión esto se realiza en un porcentaje inferior al 40% (última columna, EU28).

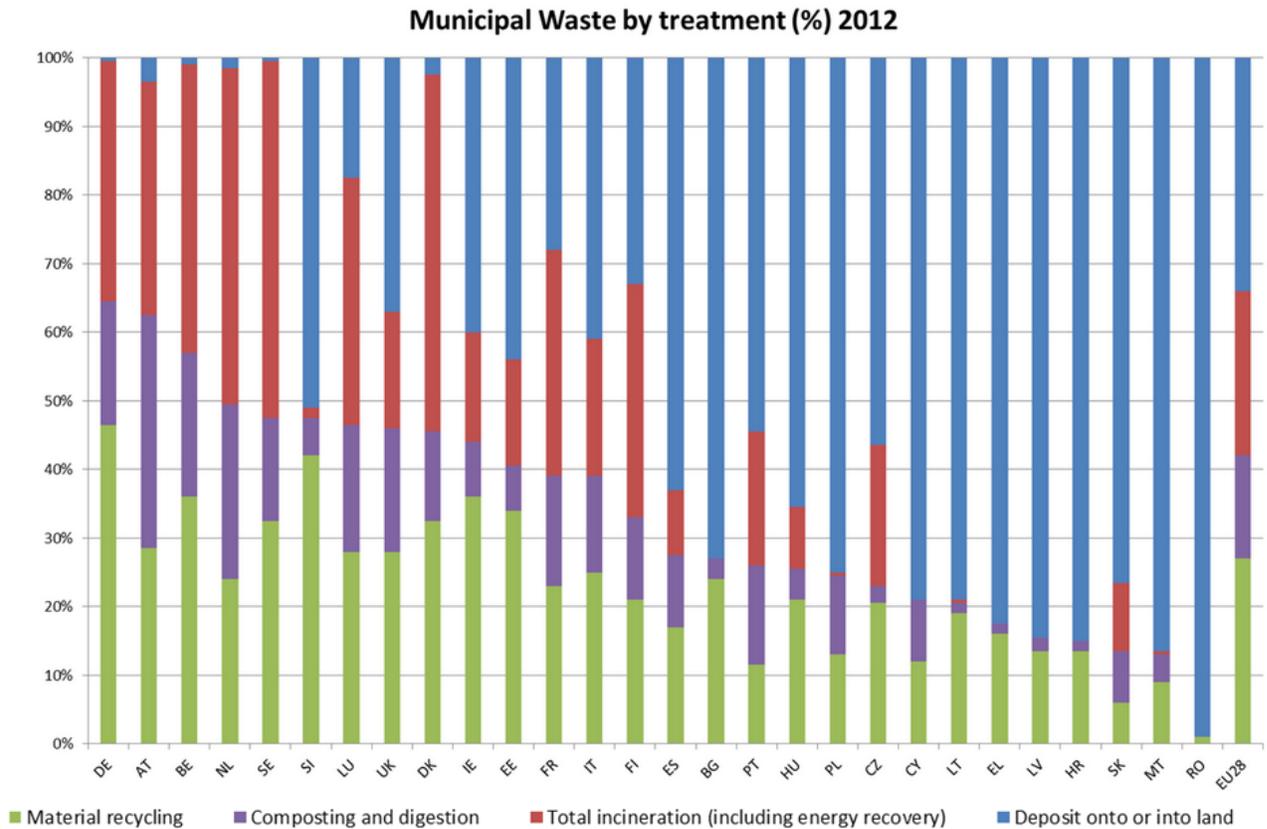


Tabla 2: Commission Communication "Towards a Circular Economy" and the Waste Targets Review. Brussels 2014

Como media, en la UE actualmente (2017) se recicla el 40% de los residuos, mientras que en España apenas se recicla hoy el 33% de los RSU, y para 2020 Bruselas planea que todos sus países miembros reciclen al menos el 50%. La Comisión planea ir más allá, y dar un paso más de "ecoambición" aprobando el 70% para el 2030.

No es posible conocer las sanciones posibles a España por incumplir estas directivas, pero el riesgo de multas elevadas es alto, y tenemos como ejemplo, los 128 millones (más intereses) de euros por el recorte en 2010 de las primas a las energías renovables.

Es necesario implantar medidas tanto fiscales como de educación cuanto antes, y de no ser así, no solo España podrá enfrentarse a multas sino puede que deje de contar con fondos europeos, por incumplimiento de obligaciones.

La primera llamada de atención a España ya ha llegado de parte del Tribunal de Justicia de la UE (TJUE) vía doble sentencia, condenando la existencia de 88 vertederos incontrolados. La primera fue emitida en febrero de 2016 y se señaló la existencia de 27 de estos vertederos activos o aun sin sellar tras su cierre. La segunda llegó en marzo del 2017 y señaló otros 61 de estos vertederos sin control. España solo reconoce 36 y asegura que los restantes han sido ya cerrados desde el dictamen europeo del 2014. El TJUE respondía que aunque estén en efecto sellados, llegan con plazo expirado (más considerando que nuestro país recibió advertencias al respecto en 2007).

El objetivo de este apartado del actual trabajo es analizar el sector de los residuos en España tanto urbanos como industriales (sector construcción) y su tratamiento.

El régimen que actualmente se encarga de regular la producción y gestión de residuos, así como fomentar su reducción y reutilización es la Ley 10/98 de 21 de abril de Residuos. Como ámbito tiene el todo tipo de residuos a excepción de los que siguen: emisiones atmosféricas, residuos radiactivos, vertidos efluentes líquidos a aguas continentales, vertidos desde tierra y aquéllos que provengan de buques y aeronaves a los mares.

Se define pues "residuo" como cualquier sustancia que pertenezca a alguna de las categorías que aparecen en la mencionada normativa.

La tipología de residuos es variada:

- a) Residuos urbanos o municipales. Son los que se generan en las viviendas, comercios servicios y oficinas, que no resultan peligrosos, además de los siguientes:
  - Residuos que procedan de la limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas.
  - Cadáveres animales, muebles, enseres y vehículos abandonados.
  - Residuos y escombros de obras menores.
  
- b) Residuos peligrosos. Corresponden a aquellos que figuran en cualquiera de las categorías indizadas en la Directiva 2008/98/CE. Entre las más significativas pueden destacarse las que sigue: cancerígeno, corrosivo, explosivo, infeccioso, inflamable, irritante, mutagénico u oxidante.

NATURALEZA Y ORIGEN	OTROS ORÍGENES
<p>NATURALEZA: no peligrosos</p> <p>ORIGEN:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Domiciliario</li> <li>Comercios</li> <li>Oficinas</li> <li>Servicios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>·Limpieza de vías, zonas verdes, áreas recreativas y playas.</li> <li>·Animales muertos domésticos, muebles y vehículos.</li> <li>·Residuos y escombros de construcción y reparación particular</li> </ul>

Tabla 3: Clasificación de residuos.

Acorde a lo establecido en dicha Ley, la planificación de la gestión de estos residuos ha de llevarse a cabo mediante un Plan Nacional que se elabore a partir del Plan Director Autonómico. En él se fijan objetivos específicos de reducción, eliminación, reutilización y otras varias formas de valorización de los residuos; así como las medidas a implantar para conseguirlo; los medios para su financiación y el proceso de revisión. El plan vigente (2007-2015) está formado por trece programas y tres documentos estratégicos.

Para realizar una valoración de los objetivos establecidos en el actual Plan de Residuos, se hace necesario destacar:

- a) Incrementar las cantidades de papel y cartón, vidrio, plástico y metales recogidas en un 80%-100%.
- b) Aumentar la capacidad de incineración con recuperación de energía en un 30%.
- c) Reducir la cantidad de bolsas de un solo uso en un 50%.
- d) Ampliar la red actual de puntos limpios dotando a todos los municipios de estas instalaciones.

Respecto a envases y residuos producto de envases, la Ley 11/1997 tiene como objeto la prevenci3n y reducci3n de 3stos en el medio ambiente durante todo el ciclo de vida. Para esto, dicha normativa plantea implantar un sistema integrado de gesti3n, e identifica los objetivos que pudieran permitir la valorizaci3n de este tipo de material.

Otros textos legislativos concernientes en el sector son el RD 653/2003 de 30 de mayo, sobre la incineraci3n de los residuos; y el RD 1481/2001 del 27 de diciembre, acerca de la eliminaci3n de los residuos mediante el uso de vertedero. El primer objetivo es la legislaci3n de las citadas actividades poniendo condiciones y requisitos para su funcionamiento, con el fin de mitigar los riesgos para la salud y sobre el medio ambiente. El segundo objetivo es establecer un marco juŕdico y t3cnico para eliminar los residuos en vertedero.

Adem3s, en el pasado a~o 2007 entraron tambi3n en vigor normas afectantes al sector, entre ellas la m3s importante es la Ley de Responsabilidad Medioambiental, cuyo 3mbito de aplicaci3n son los da~os medioambientales y las amenazas inminentes de estos por acci3n u omisi3n del hombre en actividades econ3micas o profesionales.

Esta norma tiene doble car3cter:

Por un lado, car3cter ILIMITADO. Obliga a la reparaci3n del da~o causado no con una indemnizaci3n pecuniaria, sino devolviendo los recursos naturales afectados a su estado de origen.

Por otro, car3cter OBJETIVO. Lo que significa que las obligaciones se imponen aunque no exista culpa, dolo o negligencia, excepto, da~o causado por producto no considerado potencialmente nocivo antes de causarlo, y excepto autorizaci3n administrativa.

El periodo 2008-2012 presentaba prometedores objetivos en lo que concierne a la gesti3n de residuos urbanos, a saber:

- a) Optimizaci3n de eficiencia energ3tica de los procesos de tratamiento, gesti3n y valorizaci3n.
- b) Aprovechamiento de las materias de los residuos y la recuperaci3n de biogases en vertederos.
- c) Fomento de la producci3n energ3tica a partir de residuos forestales y agroindustriales.

Dichas proposiciones se concretan en las acciones siguientes:

- a) El impulso de campañas de sensibilización para la reutilización de los residuos.
- b) Establecimiento de una estrategia nacional de biomasa y aprovechamiento de materias orgánicas.
- c) Implantación de un Plan Nacional de Residuos (2015)

### 1.1.1 Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

La gestión de los residuos urbanos se conforma por distintas operaciones de depósito, recogida, transporte y tratamiento de estos. A continuación se destacan los detalles más importantes de cada una de dichas operaciones.

- a) Depósitos. Primera fase del ciclo. Consiste en separar desde esta fase los tipos distintos de desperdicio. Para conseguirlo, los ciudadanos disponen de diferentes contenedores.
- b) Recogida y transporte. Consiste en la recolección de la basura, según su naturaleza, con objeto de transportarla a las plantas de tratamiento para el terminar el proceso.
- c) Tratamiento. Es preciso someter la basura, antes de esta fase, a una selección, aun habiendo existido un sistema de recogida selectiva. Este proceso consiste en separar la materia orgánica de otros de distinta naturaleza que se encuentren mezclados con ella.

Los distintos tipos de instalaciones de tratamiento de residuos urbanos son los que siguen:

- a) Estación de transferencia. Depósito transitorio que cumple la función de comprimir la basura para su posterior transporte a una planta de tratamiento.
- b) Planta de triaje y compostaje. Centro donde se clasifica la basura para compostarla (transformarla en *compost*, de cara a su empleo como abono de fondo y como sustituto parcial o total de fertilizantes químicos).

- c) Planta de biometanización. Instalación donde se produce biogás mediante procesos anaeróbicos (reducción sin aire) de la materia orgánica.
- d) Planta de valorización energética. Donde los residuos son sometidos a altas temperaturas para obtener gas. La energía calorífica de este proceso se aprovecha para ser transformada en electricidad.
- e) Incineradora. Dispone de una caldera de combustión donde la basura es quemada. En las más modernas el vapor se aprovecha para generar electricidad.
- f) Vertedero controlado. Espacio reservado para la deposición de los residuos compactados y no aprovechables tras su pertinente tratamiento.
- g) Planta de clasificación. Los envases son separados para su compactación y almacenamiento, para posteriormente ser retirados por empresas recuperadoras o recicladoras.
- h) Punto limpio. Recinto cerrado donde los ciudadanos tienen la posibilidad de llevar determinados tipos de residuos que por su volumen o toxicidad no pueden ser recogidos en los contenedores de basura orgánica. Aquí, son almacenados temporalmente hasta su transporte a una planta de selección, donde son separados, recuperados y reciclados.

En los párrafos siguientes se ahondará en el residuo del vidrio objeto de reciclaje en España.

El volumen de vidrio recogido en nuestro país ha mostrado un crecimiento sostenido desde el comienzo del milenio 2000. Desde el año 2000 hasta principios del 2008 las cifras de reciclaje estatal de vidrio llegó a duplicarse, pasando de 30% hasta un 60'3%. En 2015 ya se superaba en un 8% la cantidad obligada por la Unión Europea del 60%, y en el pasado año se llegó a reciclar el 70% de todo el vidrio doméstico generado por los ciudadanos.

El objetivo de Ecovidrio (entidad sin ánimo de lucro encargada de gestionar los envases de vidrio en España, cadena de reciclado, sostenibilidad y economía circular) es que para 2020 se recicle la

totalidad de los residuos de envases de vidrio, y para esto han comprometido una inversión de 300 millones de euros hasta la fecha. Además, para facilitar el reciclaje por parte de los ciudadanos, a lo largo del pasado año 2016 Ecovidrio instaló más de 9000 contenedores y ha aumentado el parque total en un 5%, alcanzando los 211.876 contenedores en España, convirtiendo al país en uno de los mejores dotados de este tipo de equipamiento, a iglú por 211 habitantes aproximadamente.



Figura 1: Portada extraída de Ecovidrio a fecha de agosto 2017

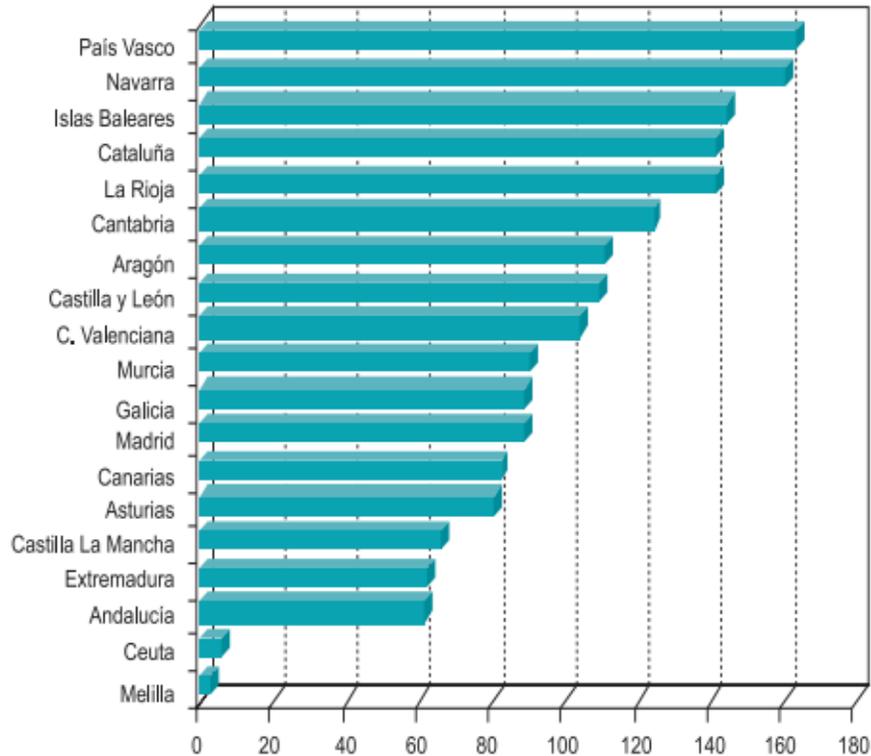


Figura 2: Volúmen de vidrio reciclado por Comunidad Autónoma (2016). Ecovidrio.

Ecovidrio se constituyó en el año 1997 bajo la falda de la Ley de Envases 11/1997, y cuyo objeto era poner en marcha la gestión de la recogida selectiva y reciclado de envases de vidrio en España. El siguiente esquema muestra la cadena de reciclado de este residuo en nuestro país.

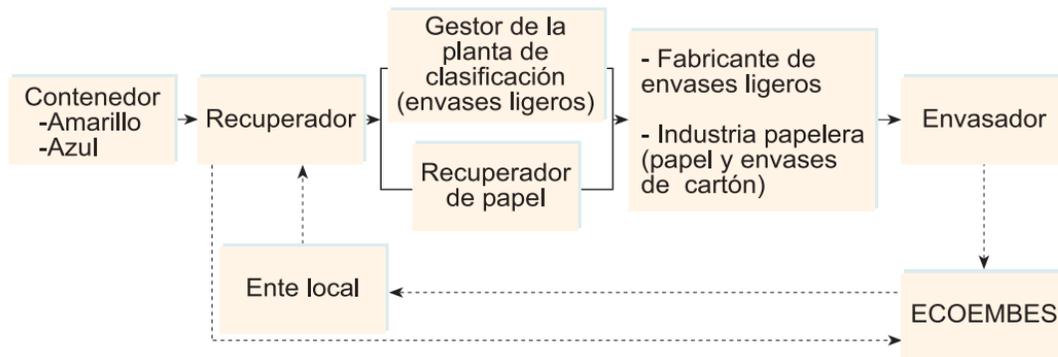


Figura 3: Cadena de reciclado de vidrio. "El sector de los residuos sólidos urbanos en España".

Los agentes interventores en el proceso son los siguientes:

1. Empresa de recogida. Transportista contratado por el organismo local para recoger los envases de vidrio, residuo de ciudadanos, de los contenedores y transportarlos hasta la instalación de tratamiento.
2. Recuperador. En la planta de tratamiento, es el encargado de retirar las impurezas de vidrio. Tras esto, el residuo es triturado para convertirse en calcín.
3. Fábrica de envases. A partir del calcín se procede a la fabricación de envases nuevos, teniendo ahora la ventaja de que el proceso requiere menos energía en forma de temperatura, respecto al proceso de fabricación original. Esto ha permitido una menor liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.
4. Envasador. Financia el sistema de recogida selectiva que realizan las corporaciones locales. Por cada envase recogido, el usuario paga una cantidad que es actualizada anualmente.

Un detalle a destacar de esta cadena es la **adjudicación del producto**, ya que una vez que este se encuentre dentro del iglú verde, el propietario pasa a ser Ecoembes, y a través de concurso público

el residuo es reasignado de dueño de entre las empresas recuperadoras y los fabricantes de envases. Estos últimos son los que financian a Ecovidrio, además de la repercusión en el consumidor de la determinada cantidad por envase puesto en el mercado.

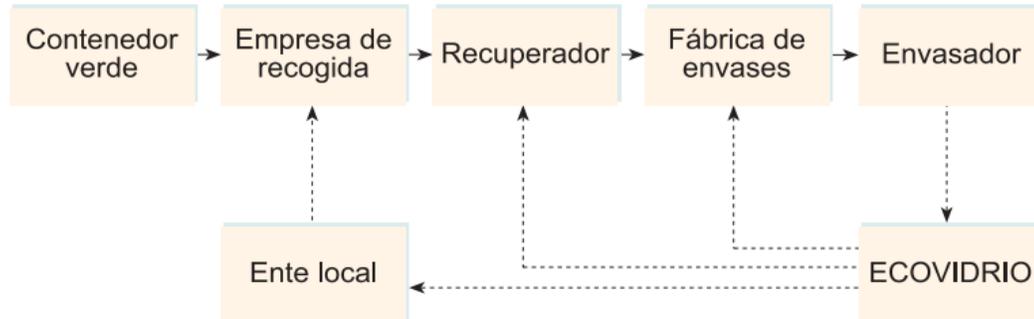


Figura 4: Financiación en la cadena de reciclado de vidrio. "El sector de los residuos sólidos urbanos en España".

Centrándonos ahora en los **modelos de gestión de RSU de España**, cabe citarse los que siguen:

- a) El organismo público con competencia en residuos urbanos promueve la instalación de una planta tratadora de residuos, correspondiendo a una unión de empresas (temporal) o a una corporación de entidad privada tanto la construcción como su explotación durante un determinado periodo de tiempo. Tras este periodo el centro es propiedad de la institución que la ha promovido, pudiendo esta última sacarla de nuevo a concurso.
- b) La entidad pública es la propietaria y se encarga de la gestión directa de las instalaciones.

También pueden distinguirse algunos organismos públicos que tienen competencias en la gestión de los residuos urbanos:

1. Ayuntamientos: la titularidad de la instalación corresponde a esta entidad aunque su explotación no tiene por qué. Esta puede ser adjudicada a una empresa privada como se ha indicado anteriormente.
2. Entidades públicas que pertenezcan a la Comunidad Autónoma: cuya misión es promover la instalación aunque la explotación corresponda a una empresa tercera. En España operan así varias empresas:
  - a. Consorcio de Gestión de los Residuos Sólidos de Asturias

- b. Consorcio de Gestión de los Residuos Sólidos de la Región de Murcia. Actual Centro de Tratamiento, Selección y Compostaje en Ulea.
  - c. Gestión y Desarrollo del Medio Ambiente de Madrid. Pública y cuyo capital pertenece a la Comunidad de Madrid, dependiente de la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio.
  - d. Gestión y Explotación de Servicios Públicos de Extremadura.
  - e. Sociedad Galega Medioambiental
3. Consorcios municipales: donde varios Ayuntamientos de la misma comarca contratan el servicio de recogida y administración de los residuos a una empresa privada.
  4. Consorcios provinciales: como las anteriores, pero con una Diputación provincial.
  5. Cabildo insular: específico de las Islas Canarias.
  6. Mancomunado: agrupaciones municipales que gestionan diferentes servicios públicos, ya sea por cuenta propia o ajena.

Citado todo lo anterior, se puede concluir con las siguientes proposiciones:

- a) Andalucía ostentó el puesto con mayor número de plantas de clasificación de envases con homologación de Ecoembes, aglutinando Sevilla un 5% de toda la cantidad nacional.
- b) Cataluña tiene el mayor número de plantas de compost de España, líder Barcelona en el ranking provincial.
- c) El mayor número de vertederos de RSU está en Andalucía y en Cataluña.
- d) Castilla y León, Madrid y Cataluña son las comunidades donde hay un mayor número de plantas de biometanización.

Provincia	Plantas de Recuperación y Compostaje (PRYC)	Plantas de Tratamiento Mecánico-Biológico (TMB)	Plantas de biometanización	Plantas de Clasificación de Envases (PCE)	Vertederos
Almería	0	3	0	3	3
Cádiz	0	3	0	3	3
Córdoba	1	1	0	1	2
Granada	0	2	0	1	2
Huelva	0	2	0	2	1
Jaén	0	3	1	1	3
Málaga	0	3	0	3	4
Sevilla	0	4	0	4	4
Total	1	21	1	18	22

Tabla 4: Instalaciones de gestión de residuos municipales de Andalucía 2016. BOJA 6, del 11 de enero de 2017

En España, en un mercado donde se hace imperativa una alta inversión, las empresas de menor tamaño gestionan plantas menores y para acceder más fácilmente al mercado, se asocian entre ellas para constituir uniones de empresas temporales. Éstas coexisten con las sociedades con capital mixto privado y público.

También, se evidencia una disparidad en la tipología de gestión que se lleva a cabo en las plantas de tratamiento en las distintas Comunidades Autónomas. Mientras en algunos casos existe la gestión completamente pública, en otros la propiedad de la instalación es pública pero su explotación es privada.

En definitiva podemos decir que el sector del tratamiento de residuos urbanos en España cuenta con un alto grado de especialización y también experiencia, aunque es necesaria una mayor ambición que nos lleve hasta las cifras del futuro europeo de 2020 en cuanto al tratamiento de los residuos.

## 1.2 Análisis de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

Los residuos generados en obras de construcción y demolición son consecuencia, además de la demolición de infraestructuras y edificios, de la nueva construcción. Son generados en entorno urbano y no forman parte de los Residuos Sólidos Urbanos (que son domiciliarios y comerciales) ya que son distintos tanto en composición como en cantidad, tratándose principalmente de residuos inertes como áridos, tierras, hormigón, cal, hierro, madera...etc.

Cuando el sector experimenta un auge, lleva ligado la generación de cantidades importantes de RCD, y si existe cierta falta de planificación y gestión final de estos, terminan siendo almacenados en vertederos comunmente sin control. Esta deposición descontrolada de RCD ocasiona una pérdida de energía y material potencialmente útil o valorizable, además de la afcción negativa al medio ambiente.

La gravedad del asunto se debe principalmente a que el vertido se realiza sin haber separado los componentes denominados 'residuos peligrosos' en emplazamientos no aptos para tal fin, siendo pues el impacto además de visual o paisajístico, perjudicial químicamente para el suelo, para el agua subterránea, y por tanto, para los ciudadanos del entorno.

Reciclados (t)	Depositados en vertedero (t)	Tratados en otras operaciones de valorización (incluidos rellenos)
1.300.768	32.644	Sin datos
No se incluyen los RCD sometidos a operaciones intermedias (R13 y D15). La cantidad depositada en vertedero corresponde a instalaciones de gestores autorizados.		

Tabla 5: Destino de los RCyD gestionados en Andalucía. BOJA 6, del 11 de enero de 2017

Grupo LER	Descripción	t
1701	Hormigón, ladrillos y materiales cerámicos	905.059
1702	Madera, vidrio y plástico	14.537
1703	Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados	21.567
1704	Metales (incluidas sus aleaciones)	432.922
1705	Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje	211.943
1706	Materiales de aislamiento	5.891
1708	Materiales de construcción a partir de yeso	566
1709	Otros residuos de construcción y demolición	244.785

Tabla 6: Distribución de la generación de RCyD 2014. BOJA 6, del 11 de enero de 2017

### 1.2.1 Gestión de Residuos Construcción y Demolición (RCD).

Como se ha indicado antes, el origen de los RCD es la construcción y demolición, rehabilitación y restauración, además de la producción de materiales necesarios para estos fines en plantas industriales o talleres.

Una somera división del sector podría ser la siguiente:

*Subsector de edificación: vivienda, oficinas, industria...etc.*

*Subsector de infraestructuras o de obra civil: vías y carreteras, canales, túneles, puentes...etc.*

Aunque sencilla, esta división es necesaria puesto que la composición de los RCD varía según el subsector implicado y se puede identificar en la mayoría de sus componentes el tipo y distribución de materias primas que usa dicho subsector, con matices que diferencian las materias comúnmente utilizadas en distintos países simplemente por diferencias constructivas, de abundancia o escasez de cierta materia prima en estado natural, poder adquisitivo u otro factor contextual. Si bien estos matices se dan en mayor medida en los materiales minoritarios del grupo de RCD.

### 1.3 Residuo de vidrio, análisis.

El vidrio es un producto del enfriamiento rápido de una mezcla fundida compuesta fundamentalmente de arena (dióxido de silicio), caliza (carbonato cálcico) y carbonato sódico, donde el material enfriado no cristaliza y retiene la organización molecular y la estructura interna. Las materias primas son fundidas en hornos a temperaturas de hasta 1500°C y el material resultante en estado fluido, en torno a los 900°C, se distribuye en los moldes que lo conforman, o a través de soplado, como tradicionalmente se ha llevado haciendo. Por último se somete a un proceso de recodido para conferirle una mayor resistencia. Se observa pues que en el proceso de elaboración del vidrio son necesarias altas cantidades de energía. El consumo de vidrio es elevado, aproximadamente 33Kg por persona al año en España, e inciden de forma importante en el volumen total de Residuos Sólidos Urbanos (RSU a partir de ahora).

Como dato estadístico, los españoles reciclaron 752.234 toneladas de envases de vidrio en 2016, 4% más que en 2015, según datos de Ecovidrio que estima la tasa de reciclado de este material (no solo del doméstico) alcanzó el pasado año el 73%, 10% más que lo exigido a España por la Unión Europea.

Según el informe Dobriš sobre el estado actual del medio ambiente en Europa, los residuos urbanos han sufrido una tendencia de crecimiento. En el área europea de la OCDE se estima un aumento en la producción de residuos de hasta el 30% en los 15 años entre 1975 y 1990.

Además, se percibe un aumento en la tasa media del incremento anual de los residuos urbanos, que pasó de un 2% en el lustro del 1980 al 1985, a un 4% en el lustro siguiente. Si se observa la producción de residuos urbanos per cápita en la década de 1980 en el resto de países europeos, se puede observar que el volumen es de entre 150 y 600 kilos por persona al año. Destaca también una relación entre el nivel de industrialización y la renta, y la tasa de residuos producidos por persona.

En el caso de nuestro país, cada español produjo de media 459.170 kilos de residuos domésticos al año, con Cataluña a la cabeza y Galicia en la cola. Por ejemplificar, la Comunidad de Madrid vió incrementada su población en el último decenio en un valor del 3'5%, mientras que la tasa de generación de RSU por persona y día lo hizo en un 44'22%.

Todo lo anterior lleva concluir con la relación que existe entre el creciente nivel de industrialización y desarrollo experimentado, y el aumento de la cantidad de residuos producidos por habitante, más aún en la producción de residuos urbanos. De forma paralela, el crecimiento de la urbanización de forma acelerada origina la formación de áreas metropolitanas donde una alta densidad de población es la que genera la mayor parte de los residuos urbanos, y en espacios relativamente pequeños.

Durante un periodo largo, el único tratamiento que se le aplicó a los residuos urbanos fue su recogida y posterior traslado a zonas alejadas de los núcleos donde se depositaban para que la mera acción de organismos y los elementos favoreciesen su desaparición. Mientras en la composición de estos residuos predominan materias orgánicas y materiales de origen natural (tejidos naturales, cerámica, vidrio, etc), y las cantidades vertidas se mantuvieron en niveles relativamente pequeños, no supusieron mayor problema.

Posteriormente el desarrollo económico, la industrialización y la implantación de modelos económicos que ponen de base del crecimiento el auge del consumo sostenido, han supuesto una variación significativa en la composición del residuo final y de la cantidad de este. Se han incorporado materiales relativamente nuevos, pero seguro, más presentes cada día en nuestro alcance, otros también han aumentado su proporción, como los metales, los derivados de la celulosa o el vidrio, que antes se reutilizaba de manera mucho mas abundante y que ahora se desechan con gran profusión.

A lo mencionado, hay que añadir la aparición en el volumen de residuo de otros elementos de gran capacidad contaminante, como lámparas fluorescentes, pilas, medicinas caducadas, aceites minerales, etc. Surgiendo así una problemática medioambiental derivada de su incontrolado vertido, causa grave de afecciones tales como:

Contaminación de suelos.

Contaminación de acuíferos y de aguas superficiales.

Aumento de la emisión de gases de efecto invernadero, por la combustión incontrolada de los materiales vertidos.

Ocupación de forma incontrolada del territorio generando la destrucción de entornos naturales.

Creación de focos infecciosos. Proliferación de plagas.

Malos olores, contaminación visual.

A todo ello hay que añadir el hecho de que la actividad económica se encuentra actualmente basada en la explotación de recursos naturales, definiéndose estos como bienes de la naturaleza potencialmente útiles para el hombre. Se clasifican en:

Renovables

No renovables, existiendo en cantidades fijas (existencias).

Potencialmente renovables. Estos exigen no sobrepasar el rendimiento de los mismos, ya que si no la degradación medioambiental resulta irreversible. Lo son recursos como el aire, el agua, el suelo, etc.

Hoy por hoy, el modelo de explotación insostenible de los recursos que caracterizó a las primeras etapas del desarrollo industrial ha comenzado a entrar en conflicto. Problemas como la debilitación de la capa de ozono, el calentamiento global, la destrucción de los ecosistemas y biodiversidad evidencian una notoria crisis a nivel planetario.

Se atisban los primeros síntomas de agotamiento claro de ecosistema, con sus consecuencias derivadas para la humanidad. En respuesta a dicha situación está surgiendo un nuevo concepto, el desarrollo sostenible, nacido de la Conferencia de Medio Ambiente y Desarrollo de Río de 1992. Éste

seha caracterizado como 'el derecho al desarrollo debe cumplir equitativamente con las necesidades de desarrollo y las del medio ambiente de las generaciones actuales y futuras'.

En definitiva se pretende que se satisfagan las necesidades humanas actuales, de acuerdo a una estrategia que respete los recursos, disminuya la degradación medioambiental y evite la sobrecontaminación, evitando hipotecar el futuro de las generaciones venideras.

Este cambio paradigmático ha influido, entre otros aspectos, en la gestión de los residuos, que han pasado de la consideración de basuras indeseadas necesarias de distar de los núcleos de población a la fuente de materias primas de nuestra sociedad, que no se puede permitir el lujo de no aprovecharla. Empieza así a calar la idea de que la gestión siempre que sea correcta, y el aprovechamiento de los residuos va a constituir un nuevo yacimiento de recurso, empleo y una oportunidad para el nuevo desarrollo económico.

### 1.3.2 Residuo de vidrio, generalidades acerca de su reciclaje

Las plantas de tratamiento del residuo de vidrio se dedican a la generación de calcín o cascós, que es un producto resultante de la trituración del vidrio, con el fin de ser vendido a empresas fabricantes y envasadoras. Es en las plantas de estas empresas donde termina la cadena de reciclaje y empieza la de producción.

Hasta hoy, resulta rentable reutilizar solamente envases mayores de 0'5 litros de capacidad, por el coste implícito del proceso de trituración, obtención y limpieza del calcín y su posterior reaprovechamiento en la fabricación de nuevos envases.

El reciclaje de botellas o envases de vidrio puede realizarse de dos formas distintas:

- Trituración de envases para obtener calcín, materia prima de envases nuevos.
- Lavado de envases mayores de 0'5 litros de capacidad para ser reutilizados.

Para una línea de reciclado estándar es necesario el siguiente conjunto de maquinaria:

1. *Trituradora*: las trituradoras utilizadas son semejantes o derivadas de las sitas en las canteras y plantas de tratamiento de residuos de construcción, y existe la siguiente tipología:

*1.a: Mandíbulas*: generan una buena distribución de tamaño del árido y genera una cantidad baja de finos, aunque este aspecto depende también de la naturaleza del

residuo (el vidrio tiene tendencia a pulverizarse, por lo que aun usando esta tipología de máquina, obtendremos elevadas cantidades de finos). La forma de las partículas resultantes es generalmente angulosa y, al menos con otros residuos de construcción, no son apropiadas para una trituración primaria (aquella que tenga lugar en primera instancia).

1.b: *Impacto*: su principal inconveniente es el gran desgaste causado por los impactos, generando una necesidad elevada de mantenimiento y seguimiento de la misma. Genera una gran cantidad de finos, según también la naturaleza del residuo como se ha explicado anteriormente.

1.c: *Conos*: el tamaño máximo de partícula admitida es de 200 milímetros aproximadamente, por lo que resulta casi exclusivamente eficaz para trituración secundaria, produciendo además una cantidad media de finos.

1.d: *Implosión*: no son utilizadas en las plantas de forma industrializada, pero en el capítulo “3.1.1 Investigaciones” se relacionan las ideas principales de un interesante estudio<sup>[8]</sup> con las bondades de este sistema de trituración.

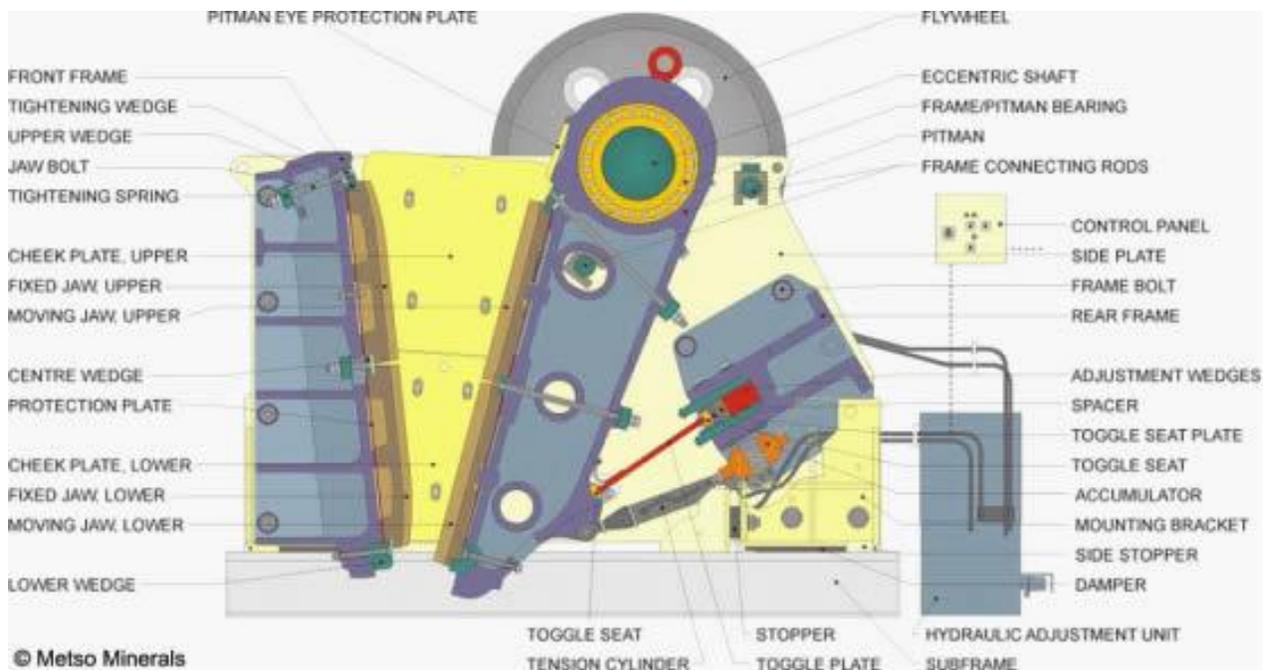


Figura 5: Trituradora de mandíbulas

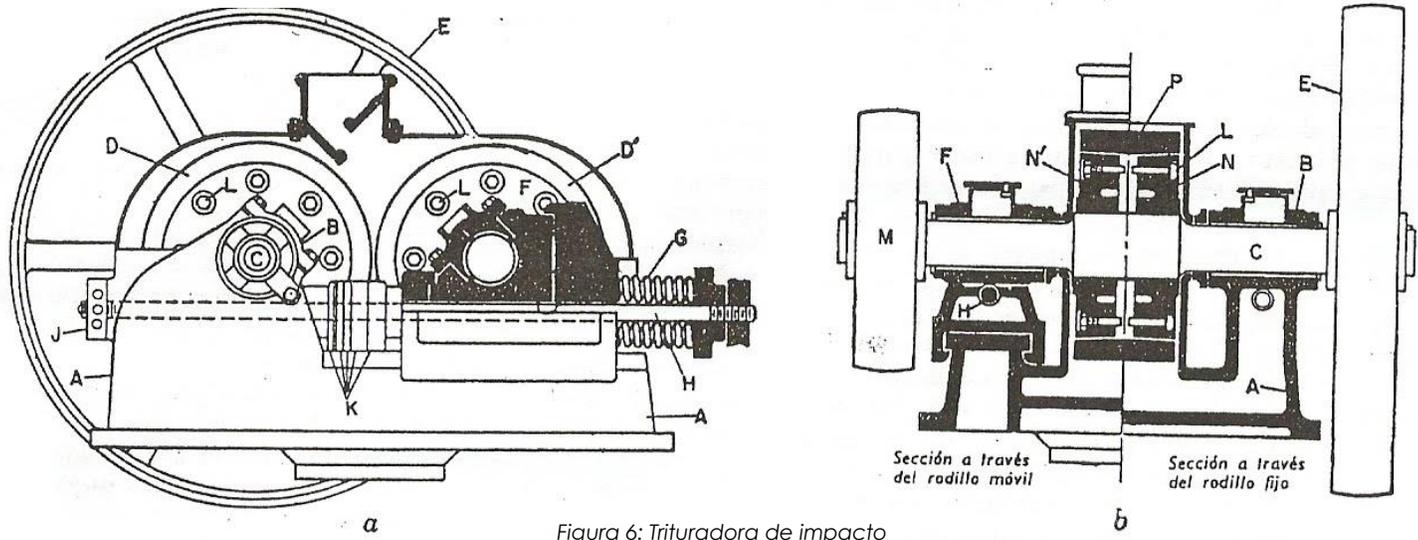


Figura 6: Trituradora de impacto

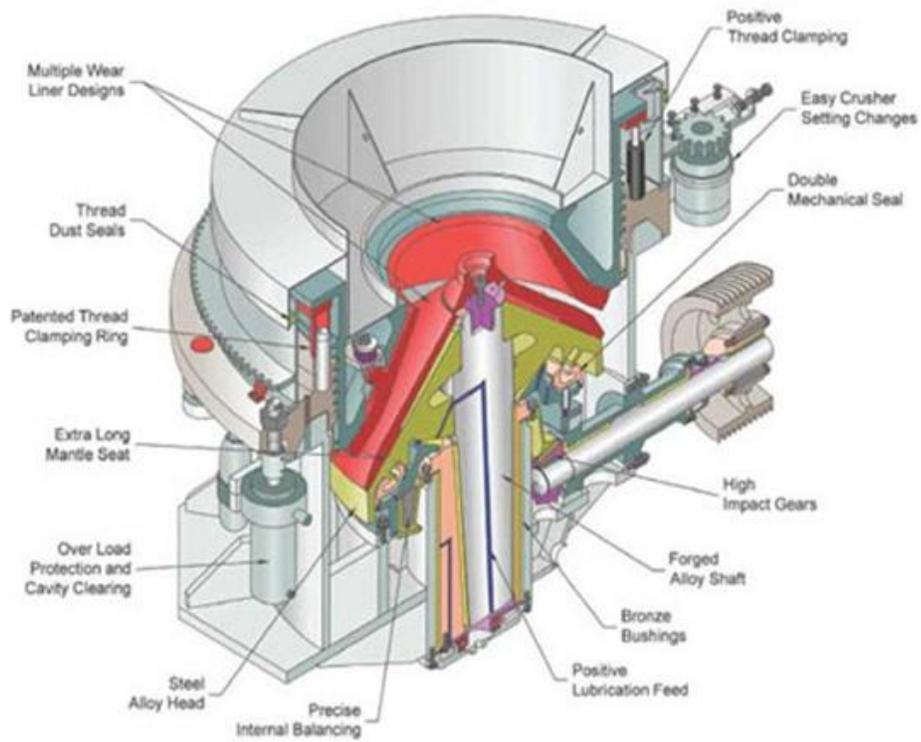


Figura 7: Trituradora de conos

La elección de la máquina apropiada depende fundamentalmente de tres factores, como son: consumo energético, coste de producción y calidad de los cascotes obtenidos.

En la siguiente tabla se resumen las propiedades principales de cada una de los tres tipos de máquina de trituración analizada:

PROPIEDAD	RENDIMIENTO	COSTE. PROD.	DESGASTE	FINOS	CONSUMO ENERGÉTICO	CALIDAD
Mandíbulas	ALTO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO
Conos	MEDIO	MEDIO	BAJO	MEDIO	MEDIO	MEDIO
Impacto	BAJO	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO

Tabla 7: maquinaria más utilizada y propiedades

Países Bajos disfruta de una amplia experiencia en el reciclaje de escombros. Allí la combinación más utilizada es la machacadora de mandíbulas para una trituración primaria (por su bajo coste y alto rendimiento), y de impacto para la trituración secundaria, obteniendo un residuo con una calidad final mayor.

2. *Transportadora*: son cintas eléctricas de transporte, que enlazan la zona de triaje con la trituradora, y funcionará una u otra según el color o tipo de vidrio que se vaya a triturar en ese momento (cada color de vidrio tiene una cinta para su transporte hasta la trituradora).
3. *Descapsuladora*: Es la máquina inicio de la línea de producción, o reutilización de envases. Tiene como objetivo limpiar de cierres y etiquetas a los envases antes de entrar en el limpiador de calcín.

4. *Limpiador de calcín*: es una máquina lavadora encargada de lavar los cascotes generados tras la trituración. Elimina las partículas de impurezas por suspensión en agua o disolución determinada, y mediante enjuague, sin necesidad de una toma de agua directa a la lavadora, puesto que el agua de la máquina se autolimpia mediante un circuito interno que se pone en marcha antes de cada lavado, aprovechando el mismo agua para 500 o 700 ciclos, lo que resulta muy importante ecológicamente. El vidrio decanta a una bandeja y es desplazado al transportador mediante cangilones agujereados (cubetas incorporadas a una cinta de transporte).
5. *Lavadora de botellas*: es la máquina que se encarga de lavar las botellas, conservándolas porque van a ser reaprovechadas sin pasar por la conversión en cascotes, sino manteniéndolas íntegras.
6. *Paletizador*: sistema de paletizado y apilado de los envases limpios listos para ser utilizados de nuevo como envase.



## 2. Objetivos

El objetivo del actual estudio además de comprobar la viabilidad de un mortero cuyo árido se encuentra parcialmente sustituido por un residuo con características mecánicas aparentemente semejantes a las de un árido convencional y aptas para el servicio, es también la de dar una salida más al desecho compuesto de vidrio doméstico, presente en los Residuos Sólidos Urbanos en la actualidad, aunque dicho residuo ya posea una alta capacidad para ser reciclado, y sólo por eso, este último es un objetivo secundario.

Mencionado lo anterior, cabe destacar que este trabajo continua en la tendencia cada vez mayor de las sustituciones parciales del árido por residuos reciclados en morteros y hormigones con la finalidad de reducir el consumo de recursos naturales. En este sentido, hay que añadir que para garantizar esta tendencia de sustitución por reciclados, el proceso de obtención del residuo, su procesamiento para ser separado (o incluso la posibilidad de no necesitar una elaborada separación de otros residuos dada la viabilidad de estos), las condiciones de transporte que a su vez implican también condiciones de seguridad e higiene, y las energéticas en general son factores a minimizar para que todo el proceso resulte rentable económica y ecológicamente. Lo óptimo sería que la incorporación de este residuo como sustituto del árido en morteros no fuera solo factible desde un punto de vista mecánico, sino que además se consiguiera aportar beneficios de compacidad, manejabilidad, etc para así poder garantizar que las operaciones de recuperación, separación y transporte del residuo no fueran el impedimento para el desarrollo de este proyecto.

En este sentido, el residuo de vidrio obtenido a partir de los Residuos Sólidos Urbanos y de los residuos producto de demoliciones de inmuebles, taras en cadenas de fabricación de productos vítreos... es un buen candidato. La logística necesaria para la obtención de este residuo no va más allá de la que existe ya hoy en día en cualquier país con una mínima preocupación por el reciclaje de residuos. La separación en planta de reciclaje del vidrio de las impurezas o trazas de otros residuos (generalmente papel y plástico) ya se realiza hoy de forma satisfactoria gracias a cribas y clasificadores. La obtención de una granulometría deseada también carece de complicación dada la poca energía requerida para triturar este desecho, máquinas trituradoras de mandíbulas, de impacto, de conos... son las que realizan hoy esa labor de forma faseada hasta obtener, en canteras y plantas de tratamientos de residuos, el diámetro de árido tradicional deseado.

La elección de este material, en primera instancia, ha sido teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas, concretamente su resistencia a compresión, su naturaleza inerte, y la posibilidad de incrementar la compacidad de su matriz cementicea gracias tanto al carácter pulverizable (obturador de poros) como de su propia compacidad, superior a la del árido silíceo tradicional que sustituye.



### 3.1 Metodología. Fuentes de búsqueda documental

Se hace necesario el análisis exhaustivo de la máxima cantidad de bibliografía que estudie las características del material compuesto en el que este trabajo se centra. Este análisis debe ser profundo por motivos como:

Pequeña cantidad de recursos que abordan el tema en cuestión

Necesario control que debe seguir un material cuya posible finalidad sea, de entre otras, la de conformar elementos arquitectónicos

Amplio abanico de factores que se hacen necesarios de tener en cuenta a la hora de determinar si un mortero finalmente es factible para un determinado uso, y en qué medida lo es.

Así pues, en lo sucesivo se procede al estudio de algunos de los trabajos que están basados en mayor medida en el tema de este mismo.

Para clasificar de una forma clara la relación de investigaciones que se analizan, y para facilitar la identificación de su enfoque se va a hacer uso de los siguientes iconos y leyenda:



Indica que el residuo de vidrio sustituye parcialmente al cemento en las muestras.



Indica que el residuo de vidrio sustituye parcial o totalmente al árido natural en las muestras.



Indica la finalidad del estudio de conseguir propiedades antirradiación del material ensayado.



Indica la finalidad del estudio de conseguir propiedades anticalóricas o refractarias del material ensayado.

### 3.1.1 Investigaciones



#### [1] Ahmad Shayan. "Value-added utilisation of waste glass in concrete". IABSE Symposium Melbourne 2002.

Shayan utiliza el vidrio como agregado en morteros de forma similar al estudio analizado anteriormente. Sin embargo, en este trabajo estudia el uso de la conocida inestabilidad del vidrio en ambiente alcalino como ventaja, no usándolo ahora como agregado sino reemplazando con él parte del cemento en ciertas dosificaciones.

Aborda también el problema del desecho de mezcla de distintos colores de vidrio, que recordemos, no puede ser refundido sin antes pasar por una minuciosa clasificación.

Recopila también de forma muy somera las alternativas que se le puede dar a este desecho, como son, entre otros:

- Agregado para carreteras

- Fibras de vidrio, aislamientos

- Abrasivos

- Fertilizante agrícola

Shayan valora el uso de una adecuada adición de humo de sílice, escoria de alto horno y/o ceniza volante si se busca la incorporación del residuo de vidrio como agregado en morteros.

En esta forma de incorporación, Shayan cita una conferencia de Pattengil "Use of Ground Glass as a Pozzolan" y un trabajo de la Universidad de Wisconsin "H.R. Samtur, Glass recycling and reuse" cuya conclusión principal es la misma, el vidrio sodocálcico como polvo fino actúa como un material puzolánico reduciendo la tendencia de reactividad árido-álcali. Desde un punto de vista económico, resulta mucho más rentable utilizar este residuo para reemplazar cierta cantidad de cemento, o de adición (humo de sílice, escoria de alto horno) que utilizarlo como agregado.

Shayan también se apoya en el trabajo de Phillips y Cahn "Refuse glass aggregate in Portland cement" en el que se observa que hasta un 35% de desecho de vidrio puede ser utilizado, sin detrimento mecánico, en morteros con cemento de baja alcalinidad.

Resulta interesante, en particular, una observación del trabajo de Jim, Meyer y Baxter "Use of recycled glass for concrete masonry blocks" en el cual Shayan también se basó. Los autores en su estudio manifiestan que el vidrio de color verde, al contener más del 1% de óxido de cromo, suprime parcialmente la reacción árido-álcali, lo que abre una pequeña línea de análisis futura, aunque hay que recordar que con el residuo homogéneo de vidrio (mismo color) no hay problema de reutilización.

La metodología que siguió Shayan en su trabajo, aunque brevemente explicada en apartados anteriores, se describe más detalladamente en las siguientes líneas.

El desarrollo experimental se dividió en tres líneas, correspondientes a los tres estados distintos de presencia del desecho de vidrio, como son: agregado grueso, agregado fino y polvo. Los tamaños de partícula son los indicados en la siguiente tabla:

PRODUCTO	RANGO DE TAMAÑOS DE PARTÍCULA	DESIGNACIÓN
AGREGADO GRUESO	12 mm – 4'75 mm	CGA
AGREGADO FINO	4'75 mm – 0'15 mm	FGA
POLVO	< 10 $\mu$ m	GLP

Tabla 8: Clasificación del agregado por tamaño

La composición química de estas tres formas del vidrio se detalla en la tabla siguiente:

COMPOSICIÓN	VIDRIO TRANSPARENTE	VIDRIO MARRÓN	VIDRIO VERDE
SiO <sub>2</sub>	72.42	72.21	72.38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.44	1.37	1.49
TiO <sub>2</sub>	0.035	0.041	0.04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.002	0.026	0.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.26	0.29
CaO	11.50	11.57	11.26
MgO	0.32	0.46	0.54
Na <sub>2</sub> O	13.64	13.75	13.52
K <sub>2</sub> O	0.35	0.20	0.27
SO <sub>3</sub>	0.21	0.10	0.07

Tabla 9: Composición química del vidrio transparente, marrón y verde

Se puede observar que la concentración del óxido de cromo (III) resulta mayor en el vidrio verde, lo que le permite aportar esa ventaja mencionada anteriormente. La composición química resulta similar en los tres casos en estos tres productos.

En el proceso experimental, tanto el agregado grueso como el agregado fino son utilizados, en tamaño de partícula adecuado, para reemplazar el agregado natural. El polvo de vidrio es utilizado para sustituir al cemento, gracias a la propiedad puzolánica antes explicada, al igual que podría usarse humo de sílice o ceniza volante.

Las dosificaciones utilizadas para los ensayos de resistencia fueron:

1. Dosificación testigo, sin vidrio, ni adición de humo de sílice
2. Dosificación 10% SF: similar a la testigo, con un 10% de adición de humo de sílice
3. Dosificación 20% GLP: mortero con sustitución del 20% de cemento por polvo de vidrio
4. Dosificación 40% GLP: mortero con sustitución del 40% de cemento por polvo de vidrio
5. Dosificación 30% GLPA: mortero con sustitución del 30% del agregado natural por agregado grueso y fino de vidrio.

Los resultados indicaron que la dosificación 10% SF producía mayores resistencias que las dosificaciones 20% y 40% GLP, y también que estas dos últimas continuaban desarrollando resistencia con el tiempo, como indicativo del carácter puzolánico del polvo de vidrio. La resistencia desarrollada por la dosificación 30% GLPA fue mayor que la desarrollada por la que contenía humo de sílice al 10%. También se indica que la dosificación 30% GLP daba peores resultados mecánicos debido probablemente a la menor cantidad de cemento, y no a la naturaleza del vidrio. Queda patente pues, en el trabajo de Shayan, el efecto favorable de la incorporación de agregado vítreo reciclado como sustituto parcial del agregado natural, y su ventaja económica frente al uso de adiciones como humo de sílice o ceniza volante.



**[4] Bashar Taha, Ghassan Nounu. “Properties of concrete contains mixed color waste recycled glass as sand and cement replacement”. *Construction and Building Materials* 22 (2008) 713-720.**

En el trabajo de Taha y Nounu se estudia la viabilidad de sustituir el árido del mortero por el desecho de la industria de vidrio que tiene como inconveniente el hecho de estar mezclado en color. Esta característica hace que los fragmentos de vidrio no se puedan refundir para su reutilización sin que haya antes una minuciosa y costosa separación manual, por lo que generalmente no se consigue aprovechar y termina siendo tratado como cualquier otro residuo no reutilizable. Los autores también proponen dar salida a este residuo incorporándolo finamente molido como sustituyente parcial del cemento.

El programa experimental lo dividieron en dos partes. La primera fue el estudio de las características plásticas del mortero con incorporación de vidrio tanto en su árido como en el cemento. La segunda parte consistió en estudiar las capacidades mecánicas de dicho mortero.

El cemento usado fue Portland CEM I, como remplazo de este se usó polvo de vidrio puzolánico (PGP) cuyo tamaño de partícula estaba por debajo de 45 µm, en cantidades del 10% y 60%. Como agregado natural se utilizó caliza de machaqueo y arena de fondo marino como finos. El residuo de vidrio que remplazaba al agregado natural en proporciones del 50% y 100% tenía un tamaño de partícula menor de 5 mm, sin tratamiento ni lavado. Se utilizó también complementariamente dos tipos de adición mineral que remplazaban al cemento, escoria de alto horno (GGBS) y metacaolin (MK). Todos los componentes fueron analizados usando fluorescencia de rayos X.

100% CEMI	40% CEMI; 60% GGBS	90% CEMI; 10% MK	80% CEMI; 20% PGP
M1: 0% RGS	M2: 0% RGS	M3: 0% RGS	M4: 0% RGS
M1.1: 50% RGS	M2.1: 50% RGS	M3.1: 50% RGS	M4.1: 50% RGS
M1.2: 100% RGS	M2.2: 100% RGS	M3.2: 100% RGS	M4.2: 100% RGS

Tabla 10: Dosificaciones empleadas en el estudio de Bashar.

Concluyen la primera parte de su estudio (estado plástico del mortero) indicando que la consistencia y la densidad húmeda se reducen al incorporar RGS posiblemente por los siguientes motivos:

Reducción de consistencia y trabajabilidad por las caras afiladas del residuo de vidrio y geometría propia de un árido de machaqueo, menos trabajable que uno redondo.

Exudación excesiva y segregación resultante de la inherente incapacidad del árido vítreo de absorber agua.

Propiedades plásticas en general reducidas con la incorporación de RGS por la falta de finos.

Sin embargo, hubo una mejora de estas propiedades tras la incorporación y sustitución de cemento por PGP.

Las conclusiones de la segunda parte del estudio (estado endurecido) son las siguientes:

La resistencia a compresión del mortero con RGS no muestra variaciones significativas respecto a la resistencia de probetas testigo. No existe por tanto una clara tendencia de variación en la compresibilidad con la adición de este residuo. Sin embargo, también concluyen en que, como sabemos, existe más de un parámetro que afecta significativamente en el comportamiento del mortero endurecido cuando el RGS es usado en la mezcla, como son:

El contenido de materia orgánica en el RGS se puede considerar como el parámetro más importante, ya que este al degradarse con el tiempo, deja poros ocluidos en la microestructura del mortero.

Las fisuras inherentes del grano de vidrio al haber pasado por un proceso de triturado.

La exudación, propia de la impermeabilidad del RGS, afectan a la trabajabilidad y puesta en servicio (segregación) del mortero fresco, y condiciona su futuro resistente.

La sustitución de cemento por PGP resulta finalmente inviable, dada la pérdida del 16% de resistencia cuando sólo un 20% de cemento CEMI fue sustituido.



**[8] Josmar Cassar, Josette Camilleri. "Utilisation of imploded glass in structural concrete". *Construction and Building Materials* 29 (2012) 299-307.**

Ante la misma problemática que tiene la mezcla de residuo de vidrio de distintos colores, los autores de este trabajo proponen la sustitución parcial de esta mezcla por parte de cemento únicamente. Cassar y Camilleri estudia de una forma más profunda la gestión primaria del residuo, concretamente su trituración. Postulan dos primeros tipos de equipamiento de machaqueo del residuo de vidrio, el primero consiste en una machacadora evolucionada de las machacadoras de roca que existen en las canteras destinadas a triturar roca.

Existen dos tipos de la machacadora citada, de abrasión y de impacto. El vidrio resulta más abrasivo que la mayoría de agregados naturales, lo que conlleva altos costes de mantenimiento para este tipo de máquina. Además, la mayoría de machacadoras de impacto producen aristas largas y

aciculares, que resulta peligroso y difícil de manipular. Debido a la naturaleza abrasiva del árido de vidrio este tipo de machacadora resulta la menos apropiada de todas.

Actualmente el equipo más apropiado para este tipo de árido es la machacadora de tipo impacto.

Sin embargo, en la década de los 90, la tecnología de implosión fue introducida como una nueva forma de triturar vidrio libre de aristas afiladas. Una resonancia armónica es creada por un rotor a alta velocidad dentro de una bomba de vacío, que concentra los trozos de vidrio en el centro del aparato. Mientras el material implosiona, otros elementos presentes en él como metal, corcho, etiquetas, etc resultan inalterados y pueden ser fácilmente recogidos a través de un proceso de tamizado.

Además de la ventaja de generar un árido sin aristas afiladas, este sistema requiere menos energía para operar cuando se compara con la machacadora de impacto tradicional, y la tecnología de vacío puede considerarse de casi nulo mantenimiento.

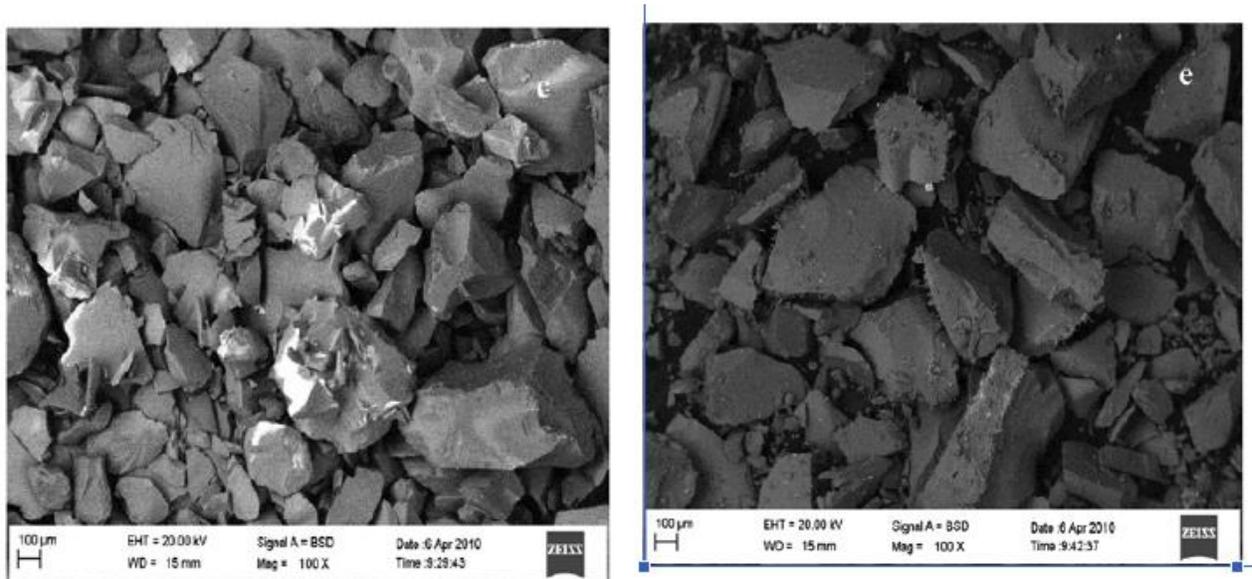


Figura 8: Vidrio machacado (c) y vidrio implosionado (e). Obtenido del estudio de Cassar y Camilleri. (Difracción de electrones por retrodispersión, 100x).

Se elaboraron muestras de sustitución de residuo de vidrio ( $< 80 \mu\text{m}$ ) por cemento Portland CEM I 42'5 desde 10% hasta 50% subiendo de 10 en 10.

Ya que este trabajo se orientó exclusivamente para comprobarla viabilidad en escolleras y espigones, además de las resistencias mecánicas, se hizo necesario estudiar también la permeabilidad a los cloruros, según la conductividad eléctrica del mortero, y la compacidad según la velocidad de pulso de ultrasonido.

Todas las muestras, excepto la de 50% de sustituci3n alcanzaron los 30 N/mm<sup>2</sup> a la edad de 28 d́as. Todas las muestras presentaron una resistencia a la penetraci3n de cloruros despreciable, incluso hubo que detener el ensayo con la muestra del 50% por sobrecalentamiento del equipo, debido a una alta conductividad eĺctrica śntoma de alta permeabilidad del i3n citado. Los ensayos de ultrasonidos dieron cifras de compacidad aptas y similares a las de la muestra testigo, aunque algo inferiores.

El proceso de implosi3n no produce diferencias mecánicas en las muestras con respecto a las machacadas de forma convencional, pero sí resulta una obvia ventaja en seguridad, además de facilitar la separaci3n de otros materiales ligados como etiquetas y metales, y un ahorro econ3mico que generado de forma indirecta debido al bajo mantenimiento de este tipo de equipo.

El porcentaje de sustituci3n 3ptimo result3 comprender desde un 10% hasta un 20% de vidrio por cemento, haciendo este tipo de mortero apto para escolleras costeras y espigones.



**[60] Tung-Chai Ling, Chi-Sun Poon, Wai-Shung Lam, Tai-Po Chan, Karl Ka-Lok Fung “Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation shielding applications”. *Journal of hazardous materials* 199-200 (2012) 321-327.**

Los tubos de rayos cat3dicos se han usado desde el 1920 para enviar y recibir imágenes de forma electr3nica en la televisi3n. Un tubo de rayos cat3dicos (TRC) est3 conformado por tres elementos, como son:

- El cañ3n de electrones
- La superficie de televisi3n
- Cono de vidrio

El elemento principal que forma un TRC es el ślice en torno al 50-60%, pero tambi3n otros elementos como 3xido de bario y 3xido de plomo se requerían para aislar de la radiaci3n a los usuarios. La superficie de la televisi3n solo tenía un 0-3% en peso de estos 3xidos protectores, mientras que tanto el cañ3n como el cono eran protegidos con hasta un 30% de ellos.

El residuo electr3nico se ha vuelto un problema medioambiental. En la Uni3n Europea, en 2001 el 80% del total de la basura electr3nica estaba compuesta principalmente por TRC de las televisiones y de los monitores pasados de era, recordemos que en esta fecha se comenzaron a comercializar los monitores y televisiones TFT planos, entrando al mercado de forma masiva.

En los Estados Unidos, los TRC supusieron un tercio del total de la basura electr3nica en el ańo 1999. Hoy los TRC son considerados peligrosos debido a su alto contenido en plomo. La Uni3n Europea y Norte Am3rica impusieron estrictas medidas y controles dirigidos a los residuos de TRC fundamentalmente. La reutilizaci3n por su reparaci3n o redistribuci3n podía disminuir la cantidad de este residuo, pero los TRC que no podían ser reparados, además de la pequeńa infraestructura que se destin3 para ello evidenciaron un remanente problema medioambiental.

Los vidrios plúmbicos, aquellos que contienen óxido de plomo en lugar de óxido de calcio en su composición son también ampliamente utilizados en diagnósticos clínicos y diversas aplicaciones médicas, por su buen aislamiento de los rayos X y otras características ventajosas.

Los materiales que los autores de este estudio utilizaron para preparar las probetas de mortero para su posterior análisis y ensayo fueron los que siguen:

- Cemento Portland
- Ceniza volante
- Agregado fino procedente de arena de río <2'4 mm
- Vidrio de TRC machacado [TRCM]
- Vidrio de TRC machacado tras un tratamiento con ácidos (detallado posteriormente) [TRCAM]
- Vidrio sodocálcico de envases domésticos [VSCA]

Nº	Nombre	Dosificaciones			Agregado fino			Agua
		Cemento	Cen. V.	Arena	TRCM	TRCAM	VSCA	
1	Control	456	152	1519	0	-	-	273
2	TRCM25	456	152	1139	433	-	-	273
3	TRCM50	456	152	759	867	-	-	273
4	TRCM75	456	152	380	1300	-	-	273
5	TRCM100	456	152	0	1734	-	-	273
6	TRCAM25	456	152	1139	-	433	-	273
7	TRCAM50	456	152	759	-	867	-	273
8	TRCAM75	456	152	380	-	1300	-	273
9	TRCAM100	456	152	0	-	1734	-	273
10	VSCA25	456	152	1139	-	-	361	273
11	VSCA50	456	152	759	-	-	722	273
12	VSCA75	456	152	380	-	-	1083	273
13	VSCA100	456	152	0	-	-	1446	273

Tabla 11: Dosificaciones de las muestras (Kg/m³). "Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation shielding applications". Tung et al.

Por cada dosificación de mortero, los autores elaboraron una muestra en forma de disco de 100x100x5 mm para evaluar las propiedades de aislamiento radiactivo.

El ensayo de aislamiento de rayos X fue llevado a cabo en un laboratorio de rayos X diseñado para exámenes de diagnósticos médicos. El laboratorio contaba con una unidad de rayos X de media frecuencia. Este recurso contaba con un coeficiente de variación en las pruebas por debajo del 2%, lo que garantizaba su rendimiento. La distancia F entre el objetivo del tubo de rayos X y las muestras

a ensayar la fijaron en 700 mm. La amplitud del haz se limitó con colimadores para garantizar que la radiación la absorbiera la muestra por completo.

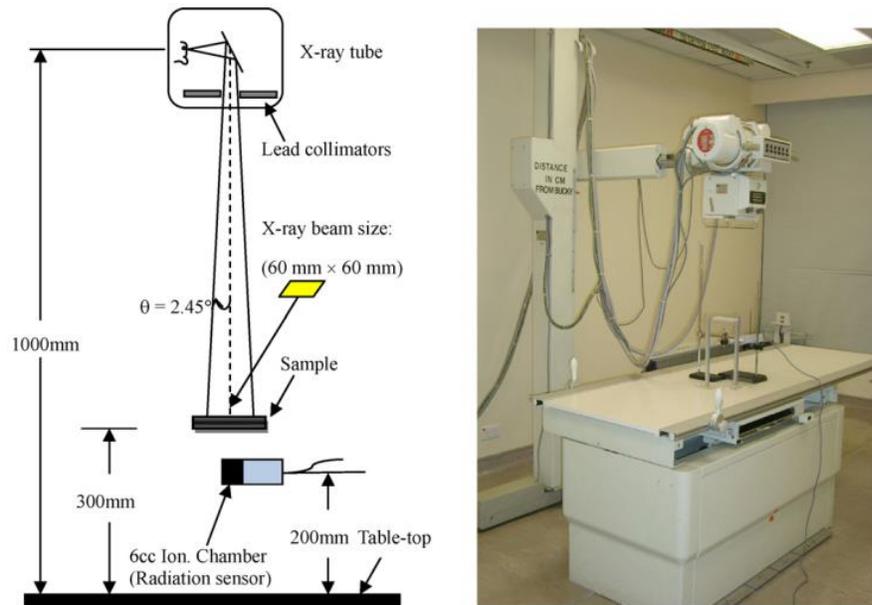


Figura 9: Esquema y fotografía del montaje del equipo utilizado. "Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation shielding applications". Tung et al.

También se ensayaron estas muestras a compresión y flexión, arrojando los siguientes resultados:

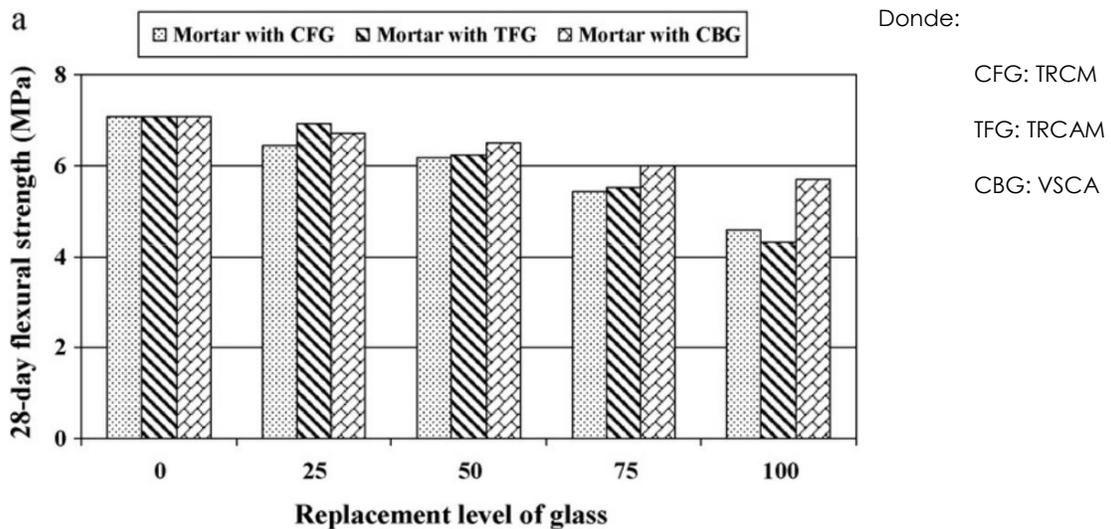


Tabla 12: Resultados ensayos a flexión (MPa). "Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation shielding applications". Tung et al

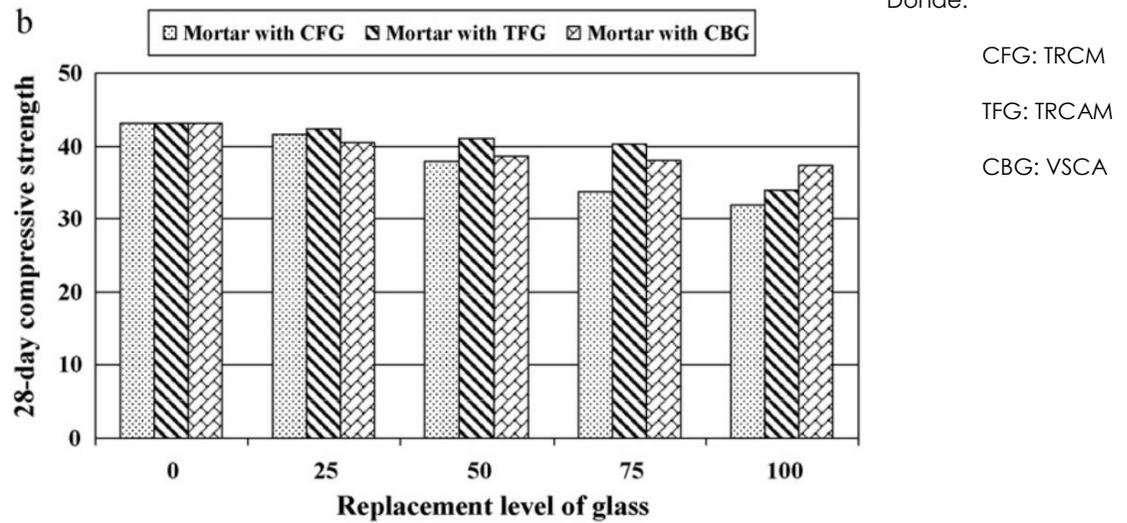


Tabla 13: Resultados ensayos a compresión (MPa). "Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation shielding applications". Tung et al

Por lo general, las muestras con 100% de agregado natural presentan mejores características mecánicas que el resto, si bien no existe una gran deficiencia mecánica siempre y cuando los valores de sustitución no pasen del 50% tanto para esfuerzos compresores como para esfuerzos flectores. Esto es debido principalmente al mismo inconveniente que hemos podido ir viendo en estudios anteriormente analizados, y como veremos en los análisis de laboratorio de este TFG en concreto, la falta de adherencia entre el cemento y el árido vítreo.

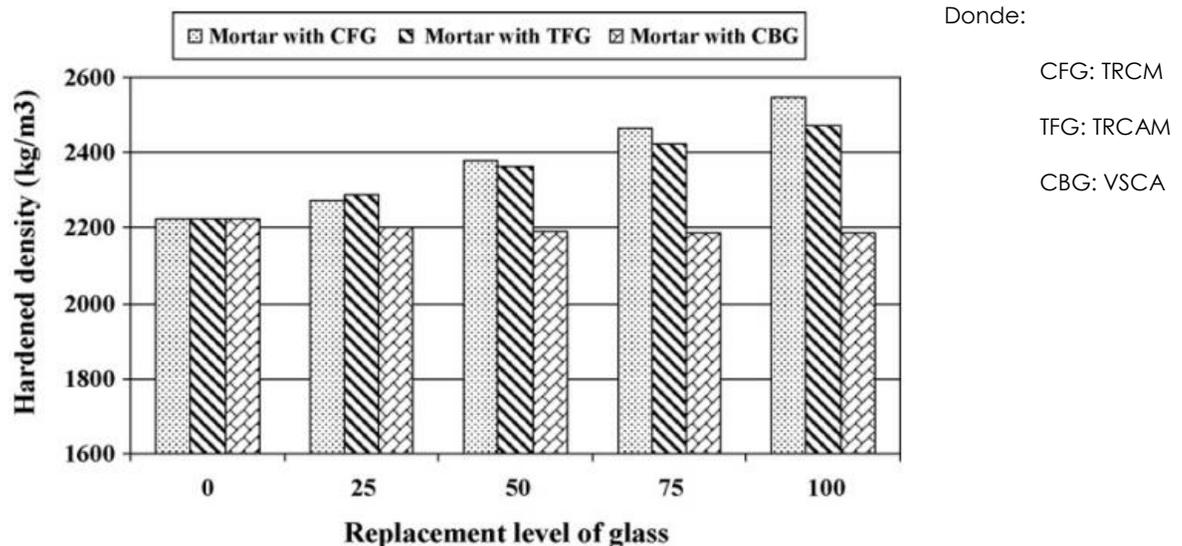


Tabla 14: Densidades de las distintas muestras. "Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation shielding applications". Tung et al

Se observan cifras congruentes en las densidades de las muestras con y sin sustitución del agregado natural por vidrio. La densidad de las muestras con más porcentaje de vidrio en lugar de arena fina de río es mayor, y las densidades de los distintos agregados sustituyentes van, en orden decreciente: vidrio de TRC, vidrio de TRC con tratamiento por ácidos, y vidrio de envases sodocálcico.

Para estimar la absorción de radiación que las muestras son capaces de proporcionar, se midió la dosis que alcanzaba el sensor bajo estas, por lo tanto, si el sensor era alcanzado por una menor radiación, significa que la muestra colocada sobre él absorbe parte de la energía y lo aísla de ella. La energía absorbida se mide en Gray, en julios de energía absorbida por kilogramo del material. En la siguiente gráfica se muestra los resultados lanzados por el sensor cuando se colocaron sobre él las distintas muestras de mortero (100% de vidrio de CRT machacado, 100% vidrio de CRT lavado con ácidos y 100% vidrio sodocálcico de envases) con distintos espesores desde 5 a 25 mm:

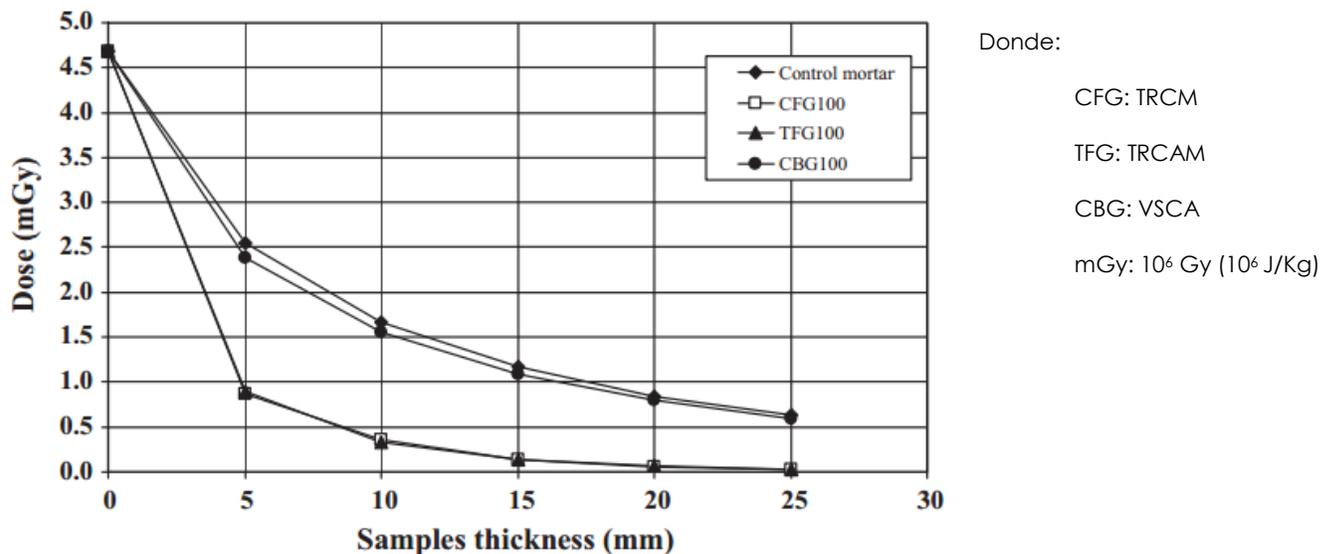


Figura 10: Radiación en Megagray (mGy) a 140 kVp (de pico) que atraviesa a las muestras y por tanto llega hasta la placa sensor. "Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation shielding applications". Tung et al

Resulta evidente que las distintas composiciones de las muestras y los distintos espesores proporcionan distintos niveles de absorción de rayos X. El menor valor lo mostraba la probeta con 100% de TRCM, esta, con un espesor de 5 mm presentaba un 56'2% menos absorción que la muestra de mortero de referencia del mismo espesor. Se hace necesaria una buena calibración de los colimadores para evitar el efecto fotoeléctrico por el cual los fotones de baja energía son transformados en electrones en movimiento, falseando los resultados.

Tung y sus compañeros concluyen en su estudio con lo siguiente:

- La cantidad de sustitución no debe exceder del 50% para que las características mecánicas no se vean gravemente afectadas.

- El vidrio sodocálcico de envases no presenta un carácter aislante antirradiaciones si se compara con la muestra de mortero de referencia.
- La densidad de la muestra aumenta con la cantidad de TRCM y TRCAM en sustitución de la arena sedimentaria.
- Es plausible la utilización de TRCM y TRCAM para fabricar elementos de mortero en aplicaciones de aislamiento de rayos X y salas de tomografía computerizada.



**[48] Pawel Walczak, Jan Malolepszy, Manuela Reben, Pawel Szymansky, Karol Rzepa. "Utilization of waste glass in autoclaved aerated concrete". Operational Research in Sustainable Development and Civil Engineering – meeting of EURO working group and 15th German-Lithuanian-Polish colloquium 2015.**

Este estudio experimental aborda el diseño de un hormigón celular curado en autoclave con diferentes tipos de desecho de vidrio como agregado fino alternativo, para su uso masivo en proyectos de viviendas que reúna los requisitos para ayudar a contribuir en la conservación del medio ambiente.

Los autores usaron tipos diferentes de residuo de vidrio, como son: vidrio de tubo de rayo catódico (CRT), residuo de paneles de aislamiento y escoria de alto horno modificada (calsiglass) para sustituir por la arena natural en el hormigón celular.

El CRT es clasificado como un desperdicio de vidrio peligroso para el medio ambiente, y existen distintos problemas que rodean a este residuo, que resulta un obstáculo en el camino de la recuperación del vidrio.

El hormigón celular ha sido principalmente utilizado como un buen material aislante, aunque su interés se ha redirigido hacia una finalidad estructural, debido entre otros aspectos a su reducido peso específico, ahorros de material, y potencial de aprovechamiento de residuos.

Los materiales usados para producir el hormigón celular son: cemento CEM I 42'5 R, óxido de calcio (cal), arena y sulfato de calcio (yeso). El cuarzo de la arena fue sustituido por los distintos residuos anteriormente citados. Comprobaron las propiedades más importantes como la reactividad de la cal, peso específico, superficie específica y la distribución de tamaños de partículas.

Las diferentes dosificaciones se detallan en la siguiente tabla:

Samples	Cement, %	Burnt Lime, %	Gypsum, %	Sand, %	CRT glass, %	Glass cullet, %	Calsiglass, %
R	33.7	11.3	5.0	50.0	-	-	-
CRT 1	33.7	11.3	5.0	45.0	5.0	-	-
CRT 2	33.7	11.3	5.0	40.0	10.0	-	-
P1	33.7	11.3	5.0	49.0	-	1.0	-
P2	33.7	11.3	5.0	47.0	-	3.0	-
P3	33.7	11.3	5.0	45.0	-	5.0	-
P4	33.7	11.3	5.0	43.0	-	7.0	-
P5	33.7	11.3	5.0	40.0	-	10.0	-
C1	33.7	11.3	5.0	49.0	-	-	1.0
C2	33.7	11.3	5.0	47.0	-	-	3.0
C3	33.7	11.3	5.0	45.0	-	-	5.0
C4	33.7	11.3	5.0	40.0	-	-	10.0

Tabla 15: Dosificaciones extraída del trabajo de Pawel Walczak et al.

Las muestras denominadas CRT son las que contienen vidrio de tubo de rayo catódico, las denominadas P contienen residuo de vidrio doméstico, y las denominadas C contienen Calsiglass, escoria de alto horno modificada.

Se muestran a continuación los resultados de los ensayos mecánicos a compresión de probetas de dimensiones 40x40x160 mm. Recordemos el uso estructural que proponen los autores para este material.

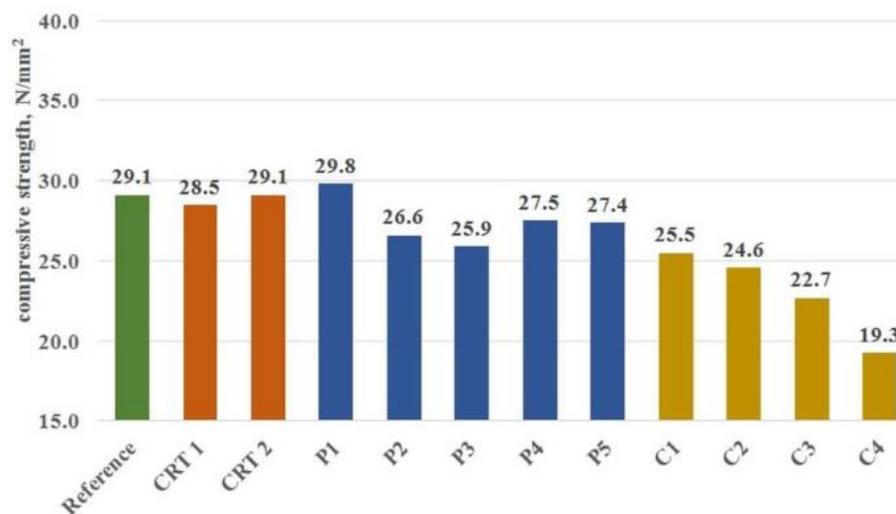


Tabla 16: Resistencias mecánicas extraídas del trabajo de Pawel Walczak et al.

Los resultados evidencian una menor resistencia del hormigón celular curado en autoclave respecto al hormigón tradicional. Las muestras con presencia de vidrio CRT tienen una resistencia a compresión similar a la de referencia. Una incorporación de vidrio doméstico del 1% (muestra P1) no conlleva una merma en la resistencia. No ocurre así con las muestras P2 a P5, que incorporan del 3 al 10% de vidrio CRT, provocando una reducción de hasta un 8% en las resistencias. La mayor pérdida de resistencia la muestra la sustitución de cuarzo por hasta un 20% de calsiglass (escoria de alto horno modificada), concretamente, una pérdida del 33% de resistencia comparada con la muestra de referencia. Esto se puede deber a que este residuo poseía el mayor tamaño de partícula de todos los residuos utilizados en el estudio.

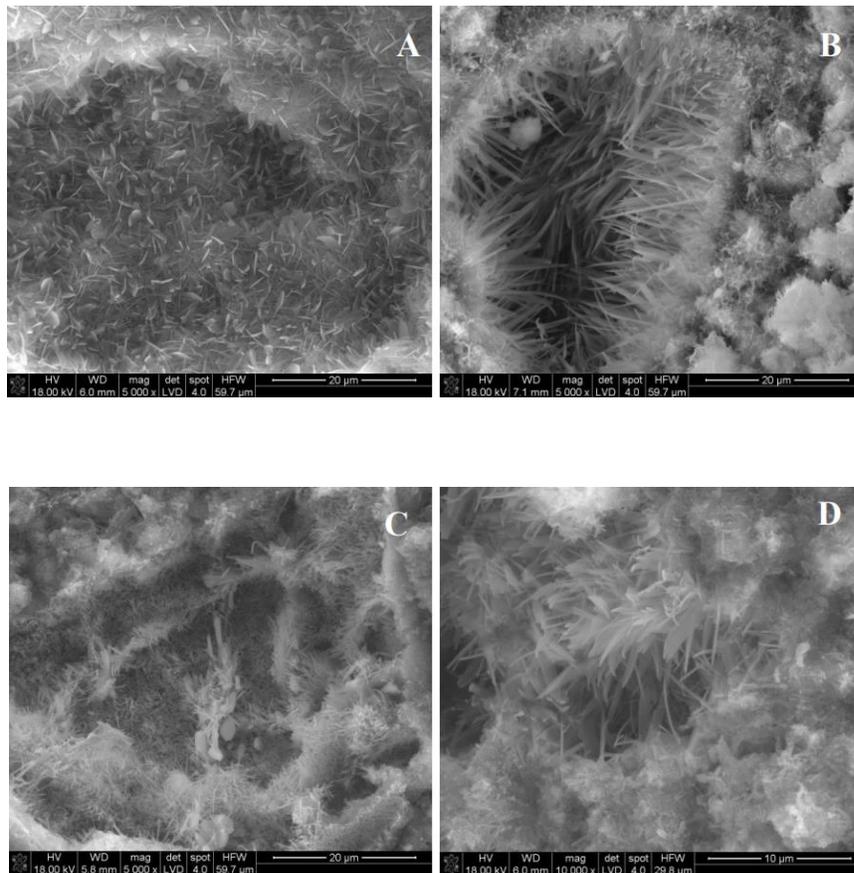


Figura 11: Imágenes de la microscopía electrónica de barrido extraídas del trabajo de Pawel Walczak et al.

El microscopio electrónico de barrido muestra que los poros en el hormigón celular de referencia, los cristales de tobermorita se presentan en forma de placas, con estructura de doble cadena de silicato. En las demás muestras, los cristales de tobermorita se presentan en forma de fibra. La cristalinidad de la tobermorita indica la hidratación del silicato cálcico.

Los autores concluyen con que resulta viable la sustitución de vidrio CRT por árido natural en proporciones de hasta el 10%, además de no alterar la hidratación del silicato de calcio. En definitiva el uso de residuo de vidrio en hormigón celular, cuidando su presencia, resulta un buen camino hacia el reaprovechamiento de este desecho.



**[64] Xin Yu, Zhong Tao, Tian Song, Zhu Pan “Performance of concrete made with Steel slag and waste glass”. *Construction and Building Materials* 114 (2016) 737-746.**

Los autores buscaban una buena respuesta ante elevadas temperaturas y llama directa del hormigón con sustitución parcial del árido por vidrio de residuo reciclado y escoria de acero. Para ello, realizaron este estudio experimental a través de dos tipos de examen, análisis del comportamiento a altas temperaturas, y del comportamiento a llama directa.

Los materiales utilizados para la fabricación de probetas fueron los siguientes:

- Cemento Portland común, con adición de escoria de alto horno y superplastificante (Polyheed 850 de BASF) como reductor de agua de mezcla.
- Árido grueso natural de río, y arena de la misma naturaleza.
- Escoria volcánica (14 – 20 mm) como agregado ligero.
- Escoria de acero procedente de horno de electroarco, y conservado en el exterior durante un año aproximadamente (para reducir los iones CaO y MgO disminuyendo así la posibilidad de causar expansiones volumétricas en el hormigón).
- Residuo de vidrio con dos tamaños de partícula: 4'9-10 mm y 4'9-16 mm procedentes de una compañía local de tratamiento y reciclaje de botellas y envases.

Debido a los efectos de la reacción árido-álcalis (ASR), el porcentaje de sustitución de árido natural por el residuo de vidrio de mayor tamaño de partícula fue limitado hasta un 17'5% en peso. Las dosificaciones de las distintas probetas son las que se detallan en la tabla siguiente:

Batch	Mix	Cement (kg)	Aggregates (kg)						Water (kg)	Water reducer (L)		
			Coarse				Fine					
			Limestone	Lightweight aggregate		Coarse slag	Waste glass				Natural sand	Fine slag
20 mm	14 mm	4.9-16 mm		4.9-10 mm								
1st	NC-1	400	1020	-	-	-	-	-	680	-	220	0.6
	LWC-1	400	-	318	318	-	-	-	680	-	220	-
	CSSC-1	400	-	-	-	1338	-	-	680	-	220	-
	SSGC-1	400	-	-	-	912	136	-	680	-	220	-
2nd	NC-2	420	1083	-	-	-	-	-	722	-	168	1.4
	LWC-2	420	-	-	490	-	-	-	722	-	168	2.2
	CSSC-2	420	-	-	-	1432	-	-	722	-	168	1.0
	SSGC-2	420	-	-	-	1193	-	179	722	-	168	2.0
	FSSC-2	420	1083	-	-	-	-	-	-	989	168	1.2
Fire test	NC-F	420	1070	-	-	-	-	-	714	-	176.4	1.4
	LWC-F	420	-	-	480	-	-	-	714	-	176.4	2.2
	CSSC-F	420	-	-	-	1418	-	-	714	-	176.4	1.0
	SSGC-F	420	-	-	-	1170	-	175	714	-	176.4	2.0
	FSSC-F	420	1070	-	-	-	-	-	413	413	176.4	1.2

Tabla 17: Dosificaciones de las probetas en "Performance of concrete made with Steel slag and waste glass". Yu, Tao, Pan.

Sin embargo, para este trabajo sólo nos interesan los resultados pertinentes de los ensayos a las muestras con sustitución parcial de árido de vidrio, SSGC-1, SSGC-2 y especialmente SSGC-F por la exposición al fuego de esta última.

Los autores señalan que algunos estudios defienden el uso de escoria de acero como agregado pudiendo incrementar las características mecánicas del hormigón hasta en un 20% debido a la resistencia propia del grano de acero y a su geometría acicular. Sin embargo, estudios más recientes indican que la resistencia a compresión del hormigón con escoria de acero es igual o incluso menor que la muestra de referencia utilizada. Pues, es de concluir en este aspecto que la resistencia del hormigón no sólo viene condicionada por la naturaleza y geometría del agregado como sabemos, sino de multitud de factores que en definitiva tienen que garantizar la durabilidad del hormigón.

La evaluación del comportamiento de la muestra ante carga (a partir de su deformación) y fuego de forma concomitante se lleva a cabo gracias a una prensa a la que se le ha acoplado una serie de quemadores junto con una caja refractaria. En la siguiente figura se muestra el mecanismo así como la colocación de los termopares que registraron las temperaturas en distintos puntos de la probeta.

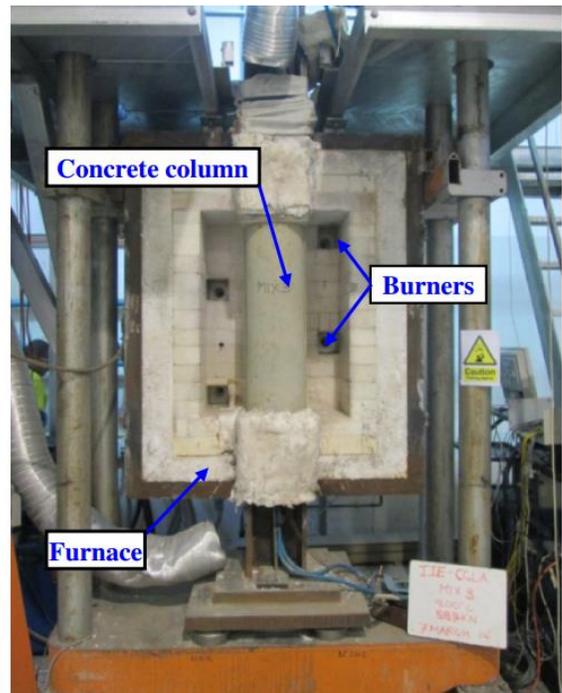
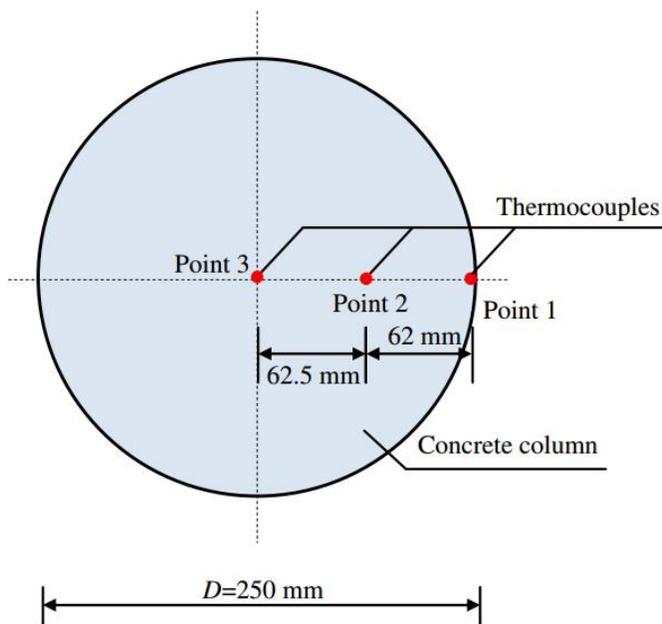


Figura 12: IZQUIERDA: posición de los termopares en la probeta. DERECHA: mecanismo puesta en carga mecánica y exposición al fuego. "Performance of concrete made with Steel slag and waste glass". Yu, Tao, Pan.

En general, las temperaturas en la probeta fueron menores que las del horno debido a la baja conductividad térmica del hormigón.

Se aprecia una meseta en la curva T-t (temperatura-tiempo) alrededor de los  $100^{\circ}\text{C}$  en los termopares 2 y 3 (interiores) que se debe a la evaporación del agua, parte de la energía se disipa para evaporarla y por eso no sigue incrementando al mismo ritmo en este periodo.

El ritmo de aumento de la temperatura fue menor en las muestras de hormigón aligerado y en las de hormigón con escoria de acero que en la testigo, debido a la estructura porosa del hormigón ligero y la disminución de la transferencia de calor de la escoria de acero.

Durante el ensayo, las muestras presentaron dos tipos de fallo. Uno de ellos fue una grave manifestación del fenómeno llamado "spalling". El spalling es un fenómeno de desprendimiento que puede ocurrir en las superficies de las capas de los elementos de hormigón cuando son expuestas al fuego. En la mayoría de los casos este fenómeno parece deberse a una combinación de presión en los poros generada por la ebullición del volumen de agua libre, y a las tensiones térmicas debidas al gradiente de temperatura. Esto se desarrolla normalmente en la capa de recubrimiento (la más expuesta) y provoca la consiguiente exposición del armado a las llamas. Este fenómeno apareció en el estudio de X. Yu *et al* en las probetas testigo y en las aligeradas.



Figura 13: Elementos con presencia de "spalling" provocado por una exposición al fuego. Hidrodemolición S.A..

El otro tipo fallo de las muestras fue una gran deformación axial de las probetas con menos spalling, las que presentaban escoria de acero y partículas de vidrio como árido, demostrando una mayor integridad del hormigón durante el test de fuego.

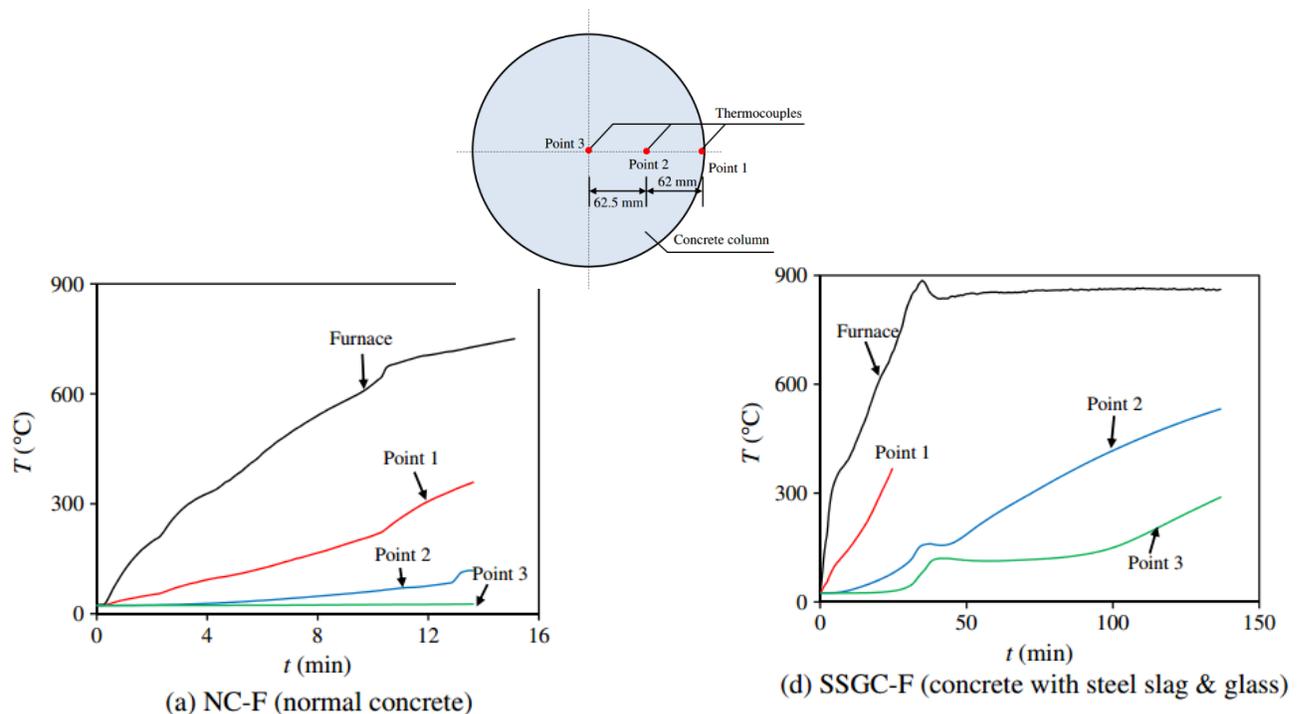


Figura 14: Curvas de exposición al fuego T-t IZQUIERDA: Hormigón de referencia. DERECHA: Hormigón con escoria de acero y vidrio. "Performance of concrete made with Steel slag and waste glass". Yu, Tao, Pan.

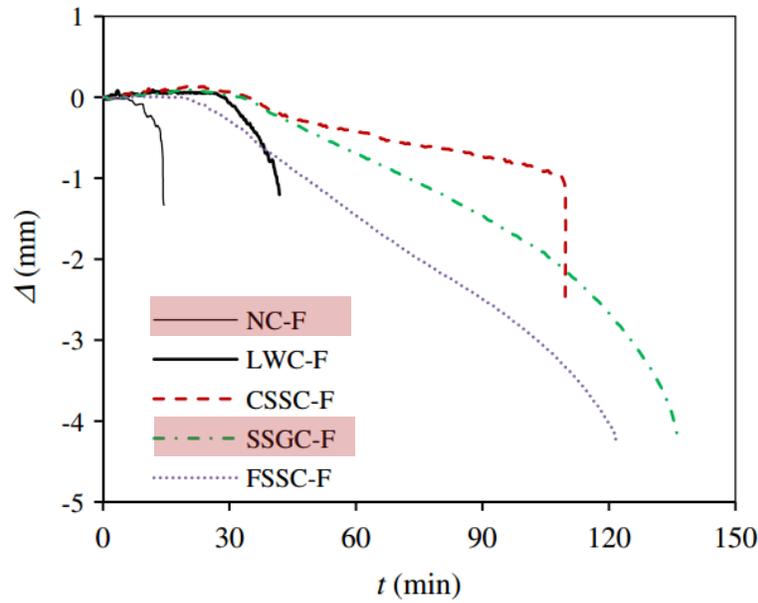


Figura 15: Curvas de deformación. NC-F Hormigón de referencia. LWC-F Hormigón aligerado. CSSC-F: Hormigón con escoria gruesa de acero. SSGC-F Hormigón con escoria de acero y vidrio. FSSC-F: Hormigón con escoria fina de acero. "Performance of concrete made with Steel slag and waste glass". Yu, Tao, Pan.

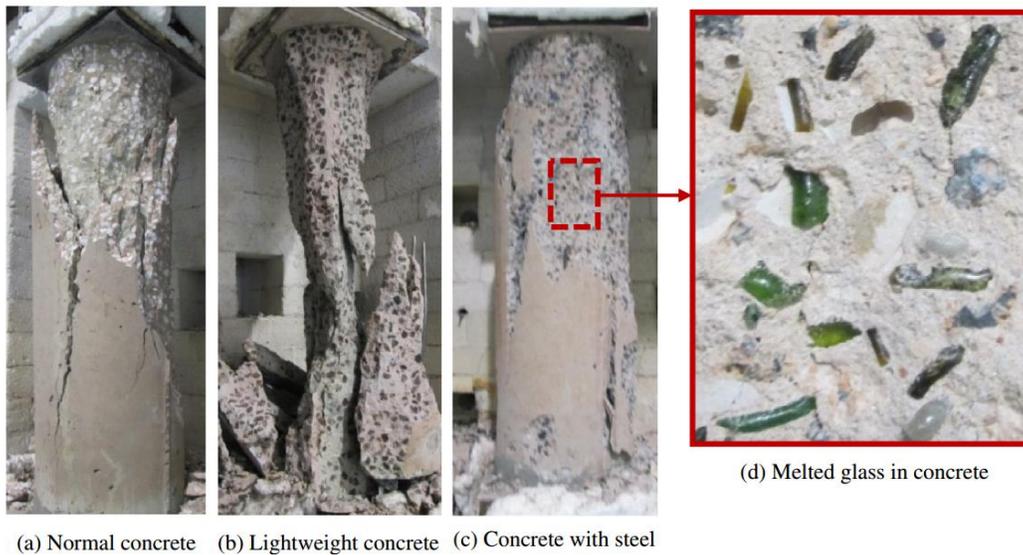


Figura 16: Tipos de fallo. A: Hormigón de referencia. B: Hormigón aligerado. C: Hormigón con escoria de acero y vidrio. "Performance of concrete made with Steel slag and waste glass". Yu, Tao, Pan.

Los autores concluyen con las siguientes premisas:

- El vidrio reciclado molido mejora la trabajabilidad del hormigón con escoria de acero.
- El uso de escoria de acero y vidrio molido incrementa la densidad del hormigón.

- El uso de escoria gruesa de acero incrementa las capacidades mecánicas del hormigón pero si se utiliza una escoria de baja calidad este efecto se revierte.

Y la conclusión que quizás resulta más interesante para el actual trabajo:

- El uso de partículas de vidrio mejora la resistencia al fuego del hormigón. Un hormigón con vidrio molido cercano a la superficie ayuda a reducir el estrés térmico.

**[29] Infante Bazán María Eugenia. Estudio y caracterización de los áridos reciclados. Proyecto fin de carrera del Grado en Ingeniería de Edificación. 2016.**

Este estudio se toma como referencia ya que aborda un tema semejante, la sustitución de árido natural por árido procedente de hormigón reciclado en morteros. Por este motivo no se indica leyenda al principio del mismo, puesto que no contiene ni el uso de árido de vidrio ni las finalidades señaladas.

La autora lleva a cabo la parte analítica de laboratorio de su trabajo de forma similar a la que se sigue en este mismo. Caracteriza cada material que va a emplear en la fabricación de muestras de mortero, elabora dichas muestras y las somete a ensayos para obtener resultados que evidencien efectos fruto de la sustitución.

Las dosificaciones que usa para las distintas muestras son de un 25%, 50%, y 75% de sustitución del árido natural por reciclado de hormigón, idénticas dosificaciones usadas en el actual trabajo para la sustitución por vidrio.

M<sup>a</sup> Eugenia somete sus probetas, geométricamente idénticas a las de este trabajo (40 x 40 x 160 mm), a ensayos mecánicos de flexión y compresión. De todas las dosificaciones obtiene resistencias mecánicas mejores que las obtenidas en las muestras testigo, con un destacable 27% de mejora a compresión de las probetas del 50% de sustitución y un 22% de mejora a flexión en las probetas de la misma dosificación. Sin embargo citando su bibliografía, Mesbah y Buyle-Bodin señalan que los morteros de esta naturaleza no alcanzan una estabilidad hasta los 480 días, inconveniente salvable con la incorporación de fibras metálicas.



Figura 17: Probetas de los ensayos de Maria Eugenia Infante.



**[53] So Yeong Choi, Yoon Suk Choi, Eun Ik Yang “Effects of heavy weight glass recycled as fine aggregate on the mechanical properties of mortar specimens”. *Annals of Nuclear Energy* 99 (2017) 372-382.**

Este estudio resulta mucho más actual pero similar al anterior (recibido por la revista “Anuales de Energía Nuclear” en abril del pasado año 2016). La razón de figurar un estudio como este en una revista de energía nuclear es el hecho de que los autores propongan el uso de morteros con residuo reciclado de vidrio en elementos que sirvan de aislamiento anti radiación en plantas nucleares, unidades médicas y otras estructuras donde esta propiedad sea necesaria.

Si bien, un elemento de mortero aislante de radiación X en un hospital no tiene una ventaja mayor que la de un panel aislante convencional. Los paneles actuales se disponen sobre raíles para permitir su movilidad teniendo en cuenta la variabilidad de necesidad de espacios durante toda la vida útil del hospital. Sin embargo, tanto en plantas nucleares como en los contenedores de residuos nucleares o en los famosos cementerios de estos residuos, tan polémicos debido al enorme peligro público y medioambiental que suponen, este mortero puede resultar apto y supondría un reaprovechamiento de residuo.

La viabilidad de este uso como escudo antirradiación la evalúan los autores de una forma analítica, e indican que hacerlo de forma experimental en Corea del Sur resultaría “un desafío”, algo que el autor de este Trabajo Fin de Grado no logra comprender, ya que Surcorea es hasta ahora uno de los mayores productores mundiales de electricidad a partir de fisión nuclear. Si bien es cierto que, según el periódico “El Debate” del día 19 del pasado junio, el presidente de la república Moon Jae-in señaló este mismo año 2017 que abandonará sus planes para añadir más plantas de este tipo, y evitará también extender la vida de las existentes.

Por lo tanto, los autores comparan de forma analítica las capacidades de protección anti radiación a partir del peso específico de la muestra. La relación entre peso específico del residuo de vidrio pesado (tubos catódicos, tubos de fluorescencia, etc) y el coeficiente de aislamiento anti radiaciones ha sido relacionado en varios artículos (Chang, 1999; Kim et al., 2005; Lim et al., 2011).

El rendimiento anti radiación según los autores del presente es el mostrado en las ecuaciones siguientes:

$$S_{28} = 0.0128W + 43.595$$

$$S_{28} = 0.01038W + 36.5$$

$$S_{28} = -1E - 5W^2 + 0.086W - 60.824$$

Donde:

$S_{28}$ : coeficiente de aislamiento a los 28 días.

W: peso específico del mortero ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ).

Los coeficientes másicos de atenuación (muestra cuánta radiación absorbe un material según su naturaleza y espesor) pueden ser estimados según:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \sum_{i=1}^N \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i f_{wi}$$

Donde:

$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ : es el coeficiente másico de atenuación del i-ésimo elemento.

N: es el número total de elementos

$f_{wi}$ : es la variación de peso del elemento

Los rayos gamma se atenúan en un valor que depende del material usado en el elemento escudo, su composición y densidad (Osman et al., 2005). Estos requisitos no siempre se satisfacen en los hormigones diseñados para este fin debido al carácter heterogéneo del propio hormigón. Esto hace que se empleen elementos como las placas de plomo, que son homogéneas y densas, y combinadas con hormigón pueden ser núcleo del elemento escudo.

Las dosificaciones utilizadas son las que siguen:

Relación agua/cemento: 35% y 45%

Sustituciones: 20% ceniza volante, 50% escoria alto horno (al 45% a/c)

Sustitución residuo vidrio: 0, 25, 50, 75, 100% (<5 mm).

Para determinar la estructura porosa de la muestra los autores usaron un porosímetro de mercurio como el de la siguiente imagen:



Figura 18: Imagen extraída del trabajo de S.Y.Choi y otros.

Los resultados muestran como el peso específico aumenta con la sustitución de residuo de vidrio pesado (tubo catódico machacado con tamaño de partícula menor de 5 mm). Al 100% de

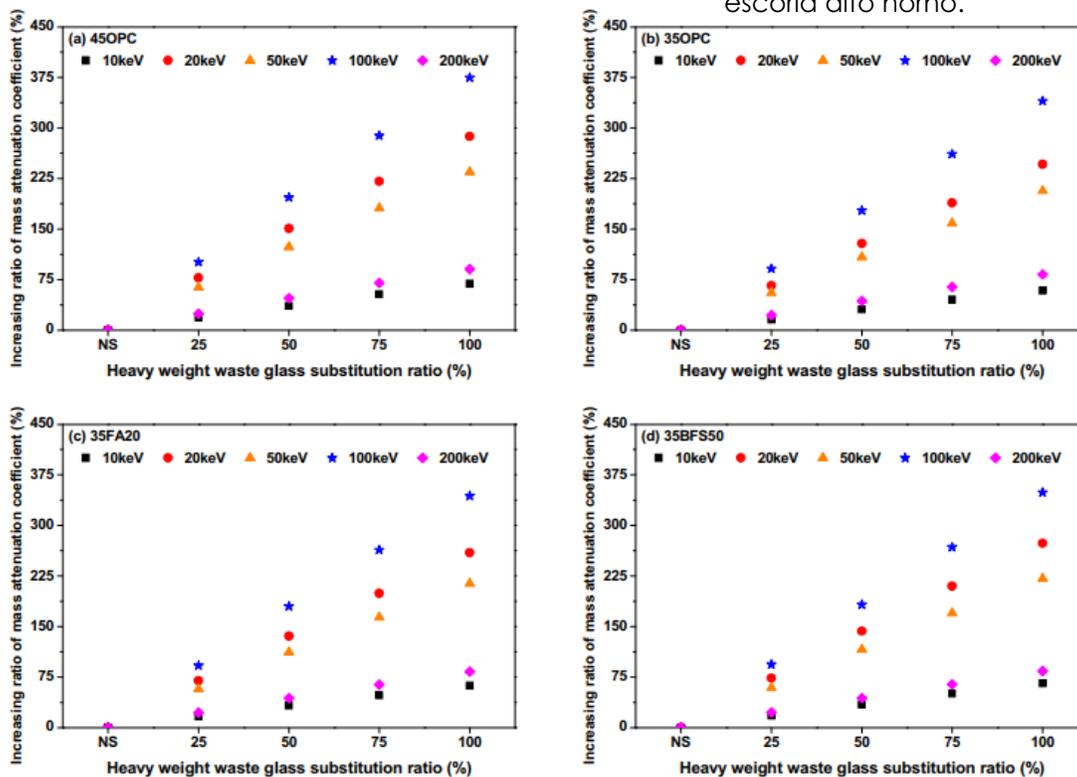
sustitución, el peso específico se incrementa hasta un 17%, sin importar la relación agua/cemento. Por tanto, la capacidad de absorción de radiación se ve incrementada con la sustitución de este residuo según los autores. Queda visualmente expresado en la siguiente tabla, donde se puede observar la relación que existe entre el porcentaje de residuo sustituido y el coeficiente másico de atenuación de las muestras.

45OPC: 45% a/c.

35OPC: 35% a/c.

35FA20: 35% a/c con sustitución 20% ceniza volante.

35BFS50: 35% a/c con sust. 50% escoria alto horno.



Figuras 19: Relación entre % de sustitución y coef. másico de atenuación, extraídas del trabajo de S.Y.Choi y otros.

Las propiedades mecánicas empeoran con la cantidad de residuo de vidrio pesado, desde un 2'3% con la sustitución del 25% respecto a la muestra testigo, hasta un 36% con el 100% de árido natural sustituido por vidrio.

Los autores concluyen con la viabilidad de este residuo como sustituto del árido natural para elementos necesarios de carácter aislante de radiaciones, en proporciones de hasta el 50% en tamaño fino de partícula (menor de 5mm). Además este uso propiciaría la reutilización del residuo pesado de vidrio.



**[38] Lim Sheau Hooi, Phang Jia Min “Potential of substituting waste glass in aerated light weight concrete”. Procedia Engineering 171 (2017) 633-639.**

Este estudio aborda la utilización del residuo de vidrio machacado como sustituto del cemento en diferentes porcentajes para la elaboración de hormigones aligerados, de la misma manera en la que se ha ido viendo en estudios anteriormente analizados.

Los materiales utilizados en las probetas de este estudio son:

- Cemento Portland CEM I 42'5 N
- Agua
- Arena
- Cal
- Yeso
- Escoria de alto horno como aditivo
- Polvo de aluminio, usado para ocluir hidrógeno dotando al hormigón de ligereza.
- Dos tipos de vidrio, ambos de dos tamaños de partícula diferente: entre 45 y 75 µm, y mayores de 90 µm.
  - Vidrio de colores
  - Vidrio transparente

Las propiedades de ambos tipos de vidrio fueron analizadas mediante fluorescencia de rayos X (FRX).

Formulations	OPC (g)	Glass (g)	GGBS (g)	Gypsum (g)	CaO (g)	Water (g)	Al powder (wt% of binder)
Control C	100	0	500	5	30	450	0.08
C10	90	10	500	5	30	450	0.08
C20	80	20	500	5	30	450	0.08

Tabla 18: Dosificaciones de las muestras de hormigón aligerado. OPC: cemento Portland, Glass: vidrio, GGBS: escoria de alto horno, Gypsum: yeso, Cao: cal, Water: agua, Al powder: polvo de aluminio. Potential of substituting waste glass in aerated light weight concrete. Sheau et al.

La composici3n qúmica de ambos tipos de vidrio reciclado resulta principalmente de  $\text{SiO}_2$ . Tambín, trazas de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  se hallaron en la mezcla de vidrio de colores, mientras que  $\text{BaO}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{ZnO}$  se encontraron en el vidrio transparente. El porcentaje de estos resulta mucho menor comparado con  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , compuestos esenciales en el vidrio como puede observarse en la siguiente tabla.

Element	Colored	Clear
$\text{SiO}_2$	66-67%	66-68%
$\text{Na}_2\text{O}$	14-16%	14-16%
$\text{CaO}$	14-16%	14-16%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1-2%	1-2%
$\text{K}_2\text{O}$	<1%	<0.5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	<0.5	<0.1
$\text{TiO}_2$	<0.5%	0.0
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	<0.1%	0.0
$\text{SO}_3$	<0.1%	<0.5
$\text{SrO}$	<0.1%	<0.5
$\text{MnO}$	<0.1%	0.0
$\text{BaO}$	0.0	<1
$\text{Pb}$	0.0	<0.1
$\text{ZnO}$	0.0	<0.5

Tabla 19: composici3n qúmica del vidrio utilizado. Potential of substituting waste glass in aerated light weight concrete. Sheau et al.

Los autores ensayaron las muestras a compresión obteniendo los resultados mostrados en las siguientes gráficas:

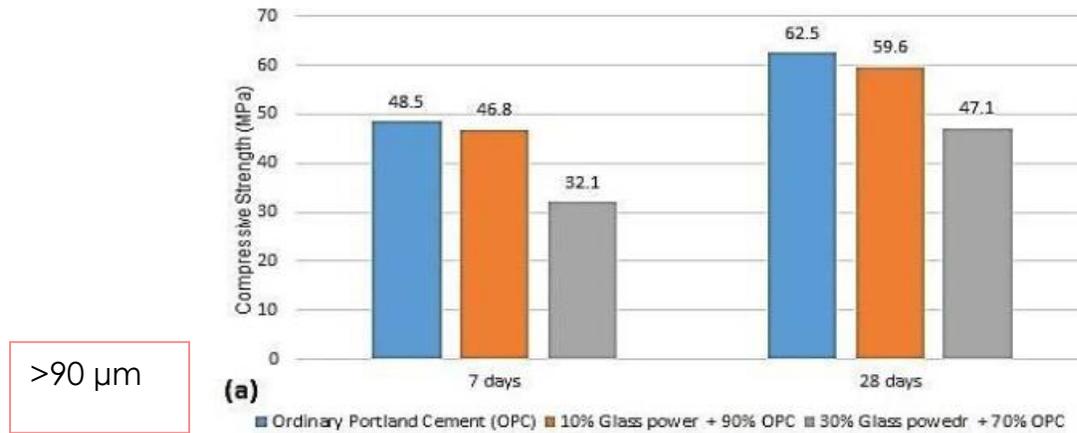


Tabla 20: Resistencias desarrolladas del hormigón con incorporación de vidrio >90  $\mu\text{m}$ . Potential of substituting waste glass in aerated light weight concrete. Sheau et al.

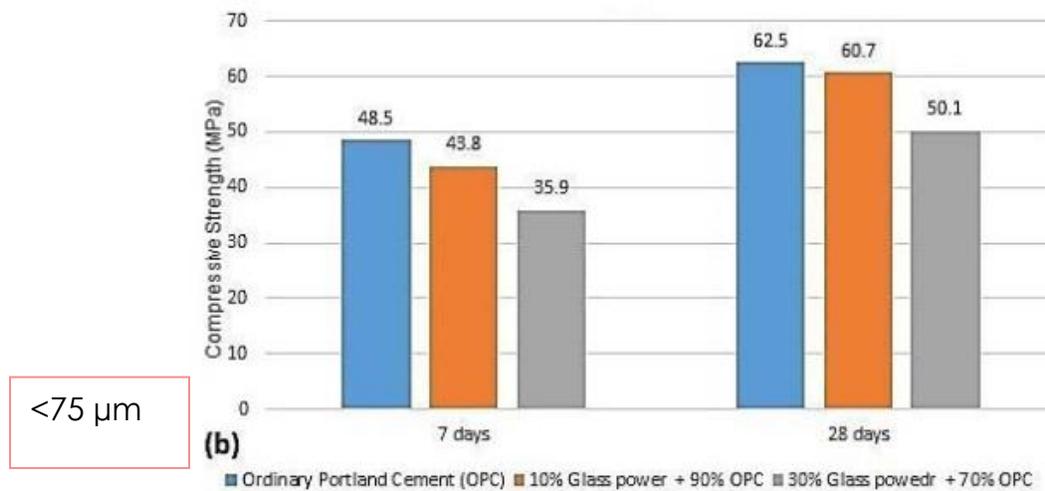


Tabla 21: Resistencias desarrolladas del hormigón con incorporación de vidrio <75  $\mu\text{m}$ . Potential of substituting waste glass in aerated light weight concrete. Sheau et al.

Se evidencia que la incorporación de residuo de vidrio como sustituto de cemento es posible en un porcentaje no superior al 10%. Es obvio que los índices de actividad temprana (a los 7 días) de los cilindros de mortero con 10% de sustitución muestran solo una insignificante diferencia respecto a los cilindros testigo. La resistencia a compresión de las muestras que mejores resultados proporcionaron (10% de sustitución) es de 46'8 Mpa y 43'8 Mpa en tamaños del árido de vidrio de >90  $\mu\text{m}$  y <75  $\mu\text{m}$  respectivamente a los 7 días. Los resultados a los 28 días subieron hasta los 59'6 Mpa y 60'7 Mpa, mientras que la muestra testigo alcanzó 62'5 Mpa.

Cuando la muestra contiene más del 20% de vidrio en lugar de cemento la resistencia mecánica desciende hasta un 20%.

Los autores calcularon la densidad de las muestras según diferencia de pesadas en estado saturado y desecado en estufa, obteniendo que la densidad de la probeta decrecía con la sustitución del vidrio por cemento, ya que la densidad del primero era un 30% inferior a la del segundo, es decir, 1051 Kg/m<sup>3</sup> del vidrio y 1522 Kg/m<sup>3</sup> del cemento, por lo que es de esperar que el vidrio aporte una disminución de densidad del hormigón.

Resulta curiosa la pequeña densidad que los autores obtuvieron del vidrio, pues suele estar en torno a 2500 Kg/m<sup>3</sup>, muy por encima de la del cemento. Esto puede deberse a la naturaleza del vidrio que utilizaron, cuya cantidad de SiO<sub>2</sub> era menor de la normal, 66% frente al 71% que obtuvimos en las muestras de vidrio utilizadas en la parte analítica de laboratorio para este TFG.

Los autores concluyeron su estudio con las siguientes proposiciones:

- El vidrio reciclado puede ser incorporado al hormigón como sustituto parcial del cemento para obtener hormigón aligerado.
- La finura del grano de vidrio influye enormemente en las características mecánicas desarrolladas por el hormigón endurecido.
- La densidad del hormigón final disminuye con la incorporación de vidrio en sustitución de cemento, principalmente por una densidad del primero menor a la del segundo provocado por la baja concentración de SiO<sub>2</sub> evidenciada en la difracción de rayos X.
- El uso de vidrio molido como sustituto de cemento es posible en hasta un 10% y la resistencia a compresión es mantenida gracias al carácter puzolánico del vidrio finamente molido.



[27] Msheer Hasan Ali, Youkhanna Zayia Dinkha, James H. Haido “Mechanical properties and spalling at elevated temperatura of high performance concrete made with reactive and waste inert powders”. *Engineering Science and Technology, an International Journal* (2017) 536-541.

En este artículo, los autores comprueban y analizan la eficiencia del residuo de vidrio molido frente al humo de sílice convencional de cara a mejorar las características mecánicas de un elemento de hormigón que ha sido expuesto al fuego.

Para ello elaboraron muestras con humo de sílice y las compararon con otras muestras que elaboraron con vidrio reciclado molido de hasta 850 µm.

Specific gravity	2.60
Density	1.3 gm/cm <sup>3</sup>
Fineness passing 850 µm	95%
<hr/>	
Composition	% by Mass
SiO <sub>2</sub>	67.78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.68
CaO	24.32
MgO	2.60
SO <sub>3</sub>	1.00
Na <sub>2</sub> O	1.99
K <sub>2</sub> O	0.36
TiO <sub>2</sub>	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11
MnO	0.03
SrO	0.76

Tabla 22: propiedades físicas y composición química del vidrio utilizado como sustituto del humo de sílice. “Mechanical properties and spalling at elevated temperatura of high performance concrete made with reactive and waste inert powders” Msheer et al.

Las dosificaciones utilizadas fueron las dos siguientes:

Constituent	HSC with silica fume	HSC with waste glass powder
Cement (kg/m <sup>3</sup> )	934	934
Silica fume (kg/m <sup>3</sup> )	234	-
Glass powder (kg/m <sup>3</sup> )	-	234
Fine sand (kg/m <sup>3</sup> )	1030	1030
Superplasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	47	47
Steel fiber (kg/m <sup>3</sup> )	40	40
Water (kg/m <sup>3</sup> )	210	210
W/C (Ratio)	0.225	0.225

Tabla 23: dosificaciones utilizadas para la elaboración de las muestras. “Mechanical properties and spalling at elevated temperatura of high performance concrete made with reactive and waste inert powders” Msheer et al.

La exposición al fuego consistió en introducir las muestras en una mufla y mantener una temperatura pico de 800°C durante 30 minutos como muestra la gráfica que sigue.

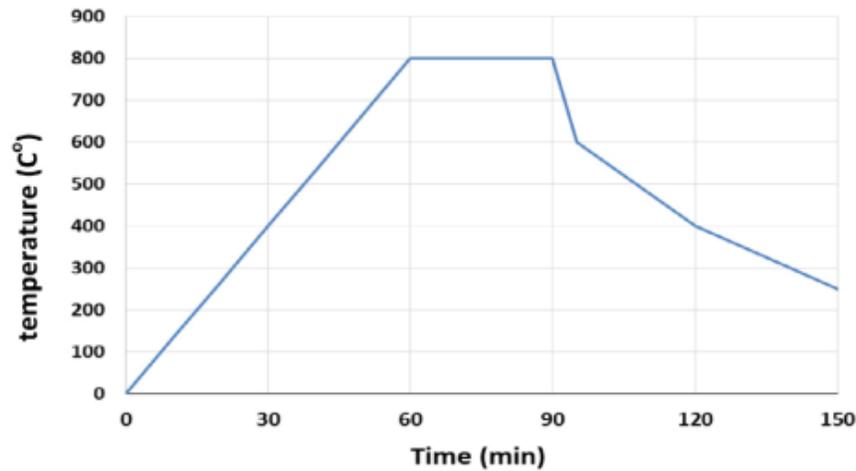


Figura 20: Curva de temperatura-tiempo registrada por la mufla. "Mechanical properties and spalling at elevated temperatura of high performance concrete made with reactive and waste inert powders" Msheer et al.

Como se puede apreciar, la única diferencia de composición en los dos tipos de muestra diferentes es la cantidad de humo de sílice que es sustituido por el polvo de vidrio reciclado.

Hay que mencionar, que para mayor precisión de los resultados, se elaboraron tanto probetas cilíndricas como probetas prismáticas, para los dos tipos de dosificaciones, ya que el calor que alcanza el núcleo de una muestra prismática (con sus caras paralelas a las paredes de la mufla) no será la misma que la del núcleo de una muestra cilíndrica.

Antes de ensayar las probetas que pasaron por el ciclo de calor-tiempo arriba mostrado, los autores tuvieron que ensayar un número determinado (un total de 33, la mitad de probetas totales elaboradas para el estudio) de probetas (probetas testigo) a compresión y flexión a temperatura ambiente y sin estrés térmico para comparar los resultados arrojados por estos con los resultados de las muestras que alcanzaron los 800°C en la mufla.

Los valores que alcanzaron estas muestras testigo son los de la siguiente tabla.

Sample designation	Compressive strength (MPa)	Flexural (tensile) strength (MPa)	Initial modulus of elasticity (GPa)
RPC-C-SF25 <sup>a</sup>	142	-	52.8
MRPC-C-GP25 <sup>b</sup>	81	-	40.4
RPC-P-SF25 <sup>c</sup>	-	6.7	-
MRPC-P-GP25	-	5.9	-

Tabla 24: Resultados de ensayos mecánicos a 25° y sin pre-estrés térmico. "Mechanical properties and spalling at elevated temperatura of high performance concrete made with reactive and waste inert powders" Msheer et al.

Donde:

RPC: muestra de hormigón con humo de sílice

MRPC: muestra de hormigón con polvo de vidrio reciclado

C: muestra cilíndrica

P: muestra prismática

25: temperatura ambiente, indica las probetas que no sufrieron el estrés térmico.

Las muestras con humo de sílice presentaron en general mejores resultados mecánicos que las de vidrio reciclado, con una diferencia de en torno al 60% (140 mPa frente a 80 mPa de las muestras con polvo de vidrio).

Las siguientes fotografías muestran los tipos de fallo de las probetas dentro de la mufla, es decir, sin haber pasado posteriormente por los controles mecánicos.



Figuras 21: Producto de estrés térmico. Spalling salvo en HS-C. "Mechanical properties and spalling at elevated temperatura of high performance concrete made with reactive and waste inert powders" Msheer et al.

Prácticamente todas las muestras sufrieron del fenómeno spalling, salvo las cilíndricas que contenían humo de sílice. Las peor paradas fueron las prismáticas, tanto las de humo de sílice como las de polvo de vidrio.

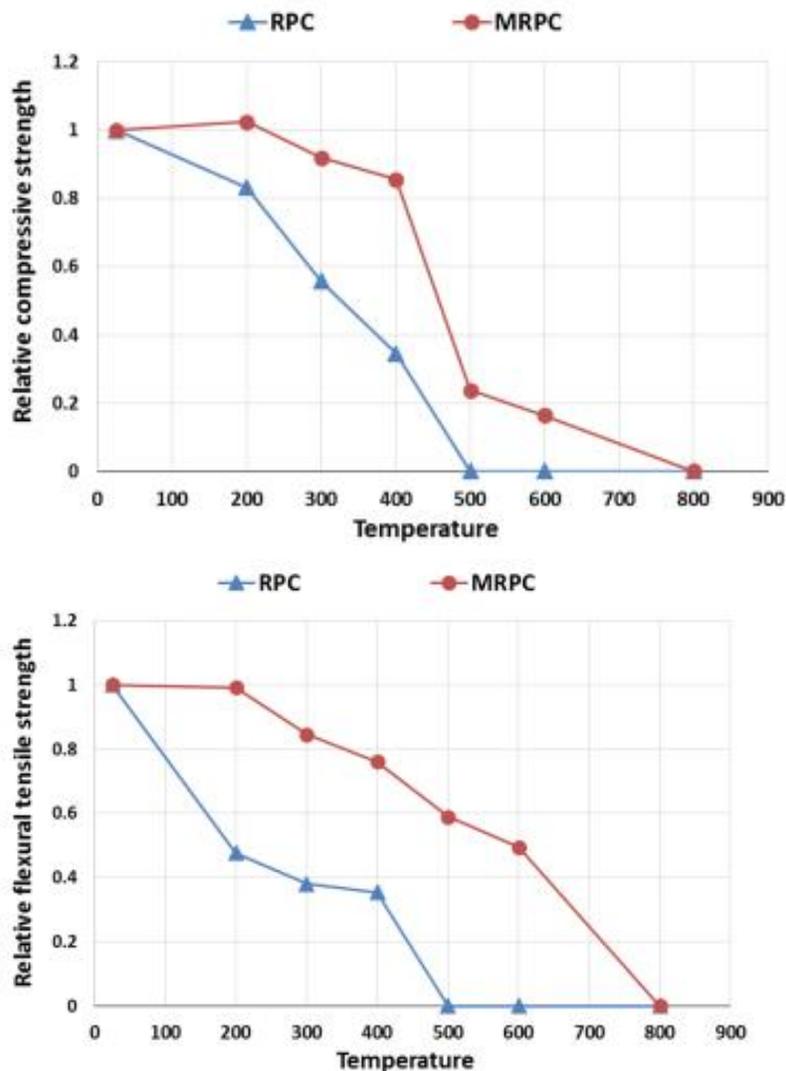
El registro completo de los efectos del ciclo de calor en el tiempo lo muestra la siguiente tabla.

<b>Samples designation</b>	<b>Spalling description</b>
RPC-C-SF25	-
RPC-C-SF200	No spalling
RPC-C-SF300	No spalling
RPC-C-SF400	Partial spalling into large pieces
RPC-C-SF500	Full spalling into small pieces
RPC-C-SF600	Full spalling into small pieces
RPC-C-SF800	Full spalling into small pieces
MRPC-C-GP25	-
MRPC-C-GP200	No spalling
MRPC-C-GP300	No spalling
MRPC-C-GP400	No spalling
MRPC-C-GP500	Partial spalling
MRPC-C-GP600	Partial spalling into large pieces
MRPC-C-GP800	Full spalling into small pieces
RPC-P-SF25	-
RPC-P-SF200	No spalling
RPC-P-SF300	No spalling
RPC-P-SF400	Partial spalling into large pieces
RPC-P-SF500	Full spalling into small pieces
RPC-P-SF600	Full spalling into small pieces
RPC-P-SF800	Full spalling into small pieces
MRPC-P-GP25	-
MRPC-P-GP200	No spalling
MRPC-P-GP300	No spalling
MRPC-P-GP400	No spalling
MRPC-P-GP500	Partial spalling into large pieces
MRPC-P-GP600	Partial spalling into large pieces
MRPC-P-GP800	Full spalling into small pieces

Tabla 25: Registro de tipos de fallo en mufla. "Mechanical properties and spalling at elevated temperatura of high performance concrete made with reactive and waste inert powders" Msheer et al.

Se aprecia que aquellas muestras que contienen polvo de vidrio alcanzan los 400°C sin presentar el problema de spalling, mientras que las muestras con humo sílice, tanto prismáticas como cilíndricas, lo manifiestan a una temperatura inferior de 300°C. Además, las probetas de polvo de vidrio presentaron un spalling severo a los 800°C, máxima temperatura del ensayo, mientras que las de humo de sílice el spalling más grave lo sufrían a los 500°C.

En las dos gráficas siguientes se puede ver la variación de las resistencias mecánicas según la temperatura. La variación se presenta, en el eje de ordenadas, sin unidad, puesto que es relacionada con respecto a la media de las probetas que no han sido sometidas a altas temperaturas, de forma que 1 es el valor de dicha media, y 0.8 es el 80% de esta media de resistencias que los autores tomaron como referencia.



Figuras 22: ARRIBA: resistencias a compresión comparadas con la resistencia media de referencia. ABAJO: resistencias a flexión comparadas con la resistencia media de referencia. "Mechanical properties and spalling at elevated temperatura of high performance concrete made with reactive and waste inert powders" Msheer et al.



## 3.2 Metodología. Propiedades del mortero y prodecimiento experimental

A continuación se detalla el trabajo abordado en el laboratorio acerca del uso de árido formado por desechos reciclados de vidrio en morteros. Se hace necesario explicar por separado las propiedades del mortero en estado fresco, y en estado endurecido. Además, hay que indicar que dicho mortero está definido según la norma UNE-EN 998-2 como "mortero de albañilería", que resulta una mezcla compuesta de uno o más conglomerantes inorgánicos, áridos, agua y puede contener adiciones y/o aditivos para fábricas de albañilería, rejuntado y trabazón de la misma. En cada propiedad, en primer lugar se describe la relación entre la propiedad en cuestión y la presencia del vidrio, y en segundo lugar puede que se haga mención a aspectos más generales en morteros tradicionales sin vidrio machacado.

### 3.2.1 Propiedades del mortero fresco

#### 3.2.1.1 Absorción de agua

La propiedad de absorción de agua en los morteros cuyo árido está sustituido parcialmente por vidrio es inferior cuanto más de este material haya. De tal forma, un mortero tradicional necesita más agua que uno con sustitución del árido natural por vítreo. Esto se debe a la nula porosidad abierta del vidrio. Dicha característica no obliga a corregir la cantidad de agua en las amasadas con incorporación de vidrio reciclado, sin embargo se puede observar una, aunque leve, mayor trabajabilidad de la mezcla en estado fresco por no existir el vínculo de adherencia agua-árido vítreo.

En el trabajo de 'Efectos del vidrio pesado reciclado como agregado fino'<sup>[53]</sup> también resaltan ésta característica.

#### 3.2.1.2 Trabajabilidad

Ésta propiedad resulta casi inalterada. Como se ha explicado anteriormente, la nula absorción de agua por parte del árido de vidrio resulta en una mejora de la trabajabilidad de la pasta en estado fresco, sin embargo, el coeficiente de forma de éste árido, y el hecho de que al ser obtenida por machaqueo de una trituradora de mandíbulas (según CEDEX, la forma de triturado que más árido acicular produce) se obtenga un árido muy anguloso, contrarresta la mínima mejora de

trabajabilidad. Por lo tanto, según las proporciones de la mezcla, ésta puede presentar una ínfima, mayor o menor trabajabilidad, normalmente hasta un 25% - 30%.

### 3.2.1.3 Contenido en aire ocluido

El contenido en aire aumenta conforme aumenta la cantidad de árido vítreo en la pasta. Esta tendencia se debe a que, a mayor cantidad de árido vítreo (con su correspondiente gran coeficiente de forma), mayor cantidad de aire ocluido.

## 3.2.2 Propiedades del mortero endurecido

### 3.2.2.1 Porosidad

La porosidad es una importante característica estructural en hormigones y morteros, influencia de forma directa las propiedades mecánicas y físicas, y el control de la durabilidad.

Según S.Y.Choi <sup>[53]</sup> la porosidad en el mortero aumenta con el aumento de la relación de sustitución de árido vítreo. También se ha observado que cuando el árido es mezclado con el vidrio no solo antes de la incorporación en la amasadora según UNE-EN 196-1, sino también con un mezclado concienzudo de la pasta una vez elaborada, el índice de porosidad disminuye, como consecuencia de la obturación de los poros entre granos de vidrio por parte de los granos menores de árido natural, y de los poros entre estos por parte de la sección de finos del vidrio (gracias a su tendencia a la pulverización). En definitiva, por una organización granular más compacta.

También, como demuestra S.Y.Choi, la distribución del tamaño de microporos (poros con tamaño menor a 0.1 micras) alcanza la cima en las 0.05 micras de tamaño. Dicho tamaño juega un rol importante en la resistencia.

La distribución de mesoporos (poros de entre 1 y 0.1 micras) no varía significativamente con una mayor presencia de árido vítreo.

### 3.2.2.2 Resistencia a compresión

En general, la resistencia a compresión en el mortero con vidrio reciclado es menor cuanto mayor sea el contenido en este. Sin embargo, en todas las muestras analizadas a los 28 días, la amasada con sustitución del 50% de árido natural por árido de vidrio ha dado valores sensiblemente superiores que los correspondientes a la amasada con 25% de sustitución.

Además, en la mitad de las muestras (2 de 4) analizadas a la edad de 28 días, se obtiene un valor sensiblemente superior al obtenido en el mortero de referencia, aunque la media total sea menor que la de este.

Esto no es así en las amasadas analizadas a la edad de 7 días, donde se demuestra una peor respuesta a este tipo de esfuerzos.

En el estudio de Choi y Yang <sup>[53]</sup> los resultados muestran una mejor respuesta a esfuerzos de compresión en la totalidad de las muestras con sustitución de árido vítreo en las cuales también había adicionado ceniza volante o escoria de alto horno, con respecto a las muestras sin árido de vidrio. Este rasgo se alcanzó a la edad de 91 días, por lo que podría ser debido al carácter puzolánico desarrollado a altas edades.

También, según estos autores, la bajada de resistencia ligada a la incorporación del árido objeto de estudio es debida además de, a la baja adherencia vidrio-cemento, a las microfisuras generadas en el proceso de machaqueo.

Los valores idóneos para Shayan y Aimin <sup>[1] [52]</sup> son del 30% y 40% de sustitución, y estos son mejores que los de referencia en su estudio.

### 3.2.2.3 Resistencia a flexión

La resistencia a flexión, al igual que a compresión, se ve afectada de forma negativa tanto como la cantidad de sustitución de árido natural por árido vítreo se vea incrementada, en las pruebas a 7 y a los 28 días. Sin embargo la diferencia de los valores de referencia con los de las muestras del 50% de sustitución es muy liviana.

Ocurre lo mismo, sin la última salvedad, en el estudio de Choi y Yang <sup>[53]</sup>, así como en el de Park y Chun <sup>[41]</sup>. Cabe concluir que estos resultados son producto de lo ya mencionado anteriormente en

cuanto a la adherencia y fisuración del árido vítreo, además de la pobre resistencia a flexión natural del vidrio.

### 3.2.2.4 Adherencia vidrio-cemento

Dado que los gránulos de vidrio de la superficie de la probeta son fácilmente aislables y separables de ella a causa de la nula porosidad del grano de vidrio, la adhesión de la pasta del mortero puede estimarse como menor cuanto mayor presencia de vidrio reciclado haya en la probeta, y menor que la adherencia de los morteros con árido natural.

### 3.2.2.5 Retracción

En este sentido se espera una menor retracción del mortero cuanto mayor sea la sustitución, debido a la nula absorción antes mencionada por parte del árido, lo cual puede ser beneficioso al evitar fisuras por esta afección.

Shayan <sup>[1]</sup> mostró en el Simposio del IABSE en 2002 en Melbourne que obtuvo valores de estabilización de la retracción a los 60 días para sus muestras con sustitución de árido de vidrio, y que era menor conforme más cantidad de este árido.

### 3.2.2.6 Resistencia a ciclos hielo-deshielo

Ésta característica está ligada a la absorción de agua y a la resistencia mecánica a flexión. El agua a presiones normales aumenta hasta un 9% su volumen al congelarse, provocando fuertes tensiones si se encuentra en el interior de un poro del elemento. Dicho elemento deberá soportar estas tensiones y la mejor forma de hacerlo es previniendo la entrada de agua, es decir, teniendo una baja absorción.

### 3.2.2.7 Ataque por sulfatos

El carácter inerte del árido de desechos de vidrio hace que el mortero no tenga una respuesta distinta que el mortero tradicional ante el ataque por sulfatos. El estudio de estos mecanismos de ataque es

un tema actual. La extensión de estos ataques depende de la cantidad de sulfato soluto y está relacionada con otros cationes y aniones presentes en la reacción.

La agresividad de los sulfatos en orden descendiente es pues: amonio, magnesio, sodio, potasio y calcio.

Los procesos de ataque pueden ser:

1. Expansión por cristalización de sales resultado de reacción con el aluminato tricálcico hidratado para formar etringita, o de reacción con cal y magnesia hidratadas para producir sulfato cálcico hidratado.
2. Pérdida de masa y resistencia por el deterioro en la cohesión, origen en la actuación del sulfato magnésico.

### 3.2.2.8 Reacción árido-álcalis

Hay que indicar que el árido de vidrio empleado en el trabajo actual no posee un tamaño de partícula tan pequeño como para que exista una superficie específica suficiente que provoque una reacción árido-álcalis importante.

La reacción árido álcalis conlleva la formación de geles que en presencia acuosa expanden, manifestándose en agrietamientos y movimientos diferenciales llevando consigo una drástica disminución de la durabilidad del elemento. Las fases de la reacción pueden dividirse en dos: siendo el primero la neutralización de los radicales Si-OH a través de una reacción ácido base, donde las cargas terminales resultan equilibradas con iones  $\text{Na}^+$ , teniendo presente que la accesibilidad de los iones  $\text{OH}^-$  y el ión  $\text{Na}^+$  se encuentra limitada por la dimensión de la zona, y por la separación entre las superficies de la partícula. El segundo paso es el ataque de los puentes siloxanos Si-O-Si por parte de los iones  $\text{OH}^-$ , reacción que lleva implícita la progresiva desintegración de la estructura.

### 3.2.3 Procedimiento experimental

Para poder proponer aplicaciones para este tipo de morteros con adiciones de vidrio reciclado se hace necesaria la obtención de resultados experimentales. El método útil más inmediato por sencillez y procedimiento técnico correcto es la comparación con morteros tradicionales sin agregado vítreo. El procedimiento experimental está recogido en la norma UNE-EN 196-1: "Métodos de ensayo de cementos, determinación de resistencias mecánicas".

Todo el plan de elaboraci3n de muestras y ensayos se ha abordado en el Laboratorio de Materiales de la Escuela T́cnica Superior de Ingenieŕa de Edificaci3n y en el Centro de Investigaci3n Tecnoloǵa e Innovaci3n de la Universidad de Sevilla (CITIUS), teniendo como objetivo principal el estudio de la viabilidad de la incorporaci3n del árido de vidrio en morteros para una posible mejora de características mecánicas y la reutilizaci3n de este residuo.

El vidrio ha sido obtenido por el autor del trabajo con ayuda del tutor, quien le indic3 a qú fabricantes de cerramientos y carpinterías podŕa dirigirse para obtener productos fruto de rechazo y taras. Ante la imposibilidad de obtenci3n de la materia prima por esta vía (las normas de seguridad e higiene lo impedían) se recurrió a la obtenci3n de envases y botellas suficientes para su posterior trituraci3n en laboratorio. El resto de componentes del mortero fueron aportadas por el laboratorio.

El proceso de análisis, de forma escueta, es la elaboraci3n de probetas con distintas proporciones de sustituci3n de árido natural por árido vítreo y su ensayo seǵn procedimientos normativos para la comparaci3n de características con las probetas de referencia.

### 3.2.3.1 Procedencia del árido natural

La arena natural utilizada procede de alguna cantera en la provincia de Sevilla que abastece al laboratorio. Es de naturaleza silíceo y tiene un diámetro máxímo de 4 milímetros.

### 3.2.3.2 Procedencia del vidrio

Como anteriormente se ha indicado, el vidrio se ha obtenido directamente de la colecci3n de envases de todo tipo de vidrio doméstico: conservas, botellas... etc. De una muestra de este (trituada hasta un tamaño de partícula <125micras), se ha realizado el análisis qúmico mediante espectrómetro de fluorescencia de Rayos X, en las instalaciones del CITIUS de la Universidad de Sevilla en espectrómetro Panalytical (modelo AXIOS) de tubo de Rh para el análisis elemental de muestras s3lida en perla de borax.



Figura 23: Equipo Panalytical AXIOS en CITIUS de la Universidad de Sevilla



Figura 24: vidrio procedente de envases

Se llegó a obtener más de 5 kg de envases, lo cual nos aseguraba una cantidad más que suficiente para las distintas dosificaciones según se muestra posteriormente.

Para la generación de la grava se procedió a un machaqueo consistente en dos pasos:

El primero consistía en un primer machaqueo para la destrucción de la geometría del envase de forma que pudiera ser introducido en la trituradora de mandíbulas del laboratorio.

El segundo paso era la introducción de los residuos del primer machaqueo en la trituradora para la obtención de grava y arena vítrea de tamaño inferior a 4 mm.

Todo proceso en el que existían riesgos derivados del machaqueo y la manipulación de residuos de vidrio era llevado a cabo con las debidas medidas de seguridad e higiene, y con los oportunos EPIs, como son:

Mascarilla FFP2 para hasta 10x VME según EN 149:2001

Guantes anticorte tipo B según UNE EN 388:2004

Gafas antiproyección de partículas tipo F según UNE EN 166:2002



Figura 25: machacadora de mandíbulas



Figura 26: EPIs utilizados para manipular residuos de vidrio

### 3.2.3.3 Dosificaciones

La trituración del vidrio se llevó a cabo con la machacadora de mandíbulas tantas veces como fuera necesario hasta que el residuo de vidrio pasara a través del tamiz de luz 4 mm.

Obtenido el residuo con el diámetro máximo especificado, se escogió la dosificación c/s=1:3 para todas las amasadas para obtener un mortero plástico en estado fresco.

El proceso de elaboración de la amasada es como sigue:

En primer lugar se preparan los componentes (agua, arena, cemento y residuos de vidrio previamente tamizados) pesándolos en la balanza. Tras esto, se procede a introducir el agua y el cemento en ese orden dentro del cazo de la amasadora, instante que se anota como "Tiempo Cero" y se pone en marcha la velocidad lenta de amasado durante 30 segundos. Tras esto, se incorpora la arena, o la arena con la proporción de sustitución por vidrio correspondiente homogéneamente mezclada (según se vaya a elaborar una muestra con o sin vidrio), y se amasa durante otros 30 segundos a velocidad lenta. Transcurrido este periodo, se amasa a velocidad rápida durante otros 30 segundos para después, detener el amasado durante 30 segundos y retirar tanto de las paredes del cazo como de la pala los restos adheridos de mortero y llevarlos a la zona de amasado de la máquina. Se reanuda la marcha durante 60 segundos a velocidad rápida y se concluye el amasado.



Figura 27: amasadora planetaria

Obtenido ya el mortero se procede al llenado de los moldes con ayuda de una espátula, para posteriormente compactarlo en la compactadora con 60 golpes y finalmente, perfeccionar y enrasar las caras superiores. Finalmente los moldes se cierran en plástico para que no pierdan humedad durante 24h. Transcurridas esas 24h se llevan a la cámara de humedad hasta desmoldar a los 7 y a los 28 días.



Figura 28: Compactadora automática



Figura 29: moldes enrasados

En el siguiente cuadro se pueden ver las distintas dosificaciones utilizadas.

Dosificación mortero	Cemento (gr)	Arena (gr)	Vidrio (gr)	Agua (gr)
Referencia	450	1350	0	225
Mortero con 25% vidrio	450	1012,5	337,5	225
Mortero con 50% vidrio	450	675	675	225
Mortero con 75% vidrio	450	337,5	1012,5	225

Tabla 26: Dosificaciones

### 3.2.3.4 Comprobación de la compacidad

La determinación de la compacidad de las muestras se comprobó a través de dos métodos, mediante diferencia de pesadas entre la muestra saturada y desecada, y mediante emisión y recepción de ultrasonidos.

El primero de los métodos consiste en pesar en báscula la muestra tras haber pasado 24 horas sumergida en agua y volverla a pesar en la misma báscula tras pasar otras 24h en estufa a 100°C de forma que la diferencia entre peso saturado (S) y peso desecado (D) nos aporta el peso del agua que ocluye los poros abiertos (Pa):  $S-D=Pa$ . A partir de esta diferencia podemos hacernos una idea de lo compacta (C) que es la muestra, siéndolo más cuanto menor sea esta diferencia. Según este método, una muestra con  $C\%=100$  no tiene poros en su superficie.

$$C\% = \frac{S - D}{D \times 100}$$



Figura 30: Termómetro de la estufa de desecado.



Figura 31: aparato de ultrasonidos.

El segundo método utilizado para comprobar la compacidad de las muestras elaboradas consistió en examinarlas con el equipo de ultrasonidos. Este aparato consiste en un transductor emisor que envía un pulso ultrasónico a través de la pieza hasta un transductor receptor midiendo tanto el tiempo de propagación del pulso como la distancia entre transductores.

Hay que asegurar un buen acoplamiento entre el transductor y la superficie de la muestra, esto se logra colocando vaselina entre las caras. Deben mantenerse los transductores en una posición fija hasta que la medición (en tiempo real) sea estable. Hay que realizar 3 lecturas en la dirección transversal de la probeta y una en la dirección longitudinal. Con una media de velocidad de pulso elevada se manifiesta que la muestra tiene una elevada compacidad, mientras que si la media de las velocidades leídas es baja, se evidencia una deficiente compacidad. El aparato debe calibrarse en cada utilización, para ello el fabricante incluye un calibrador de distancia y velocidad de transmisión conocidas, en la Figura 31: sobre el aparato.

Este método resulta complementario del primero ya que se obtiene una referencia del estado del interior de la probeta, mientras que en el método de la diferencia de pesadas sólo se obtiene una referencia de la porosidad en la superficie hasta cierta profundidad (tubo capilar) sin llegar al núcleo.

### 3.2.3.5 Comprobación de la resistencia al fuego

En este trabajo se quiso comprobar la resistencia al fuego de las muestras con vidrio sustituto del árido natural, ya que el vidrio tiene un coeficiente de conductividad térmica menor que el árido natural generalmente utilizado,  $0,82 \text{ Kcal/h} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$  del vidrio frente a  $1 \text{ Kcal/h} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$  de la arena silíceo.

El proceso consistió en someter a las muestras a altas temperaturas y mantenerlas durante 1 hora para posteriormente ensayarlas a compresión según se describe en el apartado siguiente. Las muestras se introdujeron en una mufla que estaba a  $600^\circ\text{C}$  en el momento de la introducción, provocando así un calentamiento brusco y recreando una exposición al fuego de una forma más fiel que si las probetas hubiesen tenido una curva gradual de calentamiento. Se mantuvieron a esa temperatura durante una hora, tras lo cual se sacaron y se dejaron enfriar al aire hasta una temperatura apta para poder manipularlas con seguridad (aproximadamente hora y media).

Dados los buenos resultados de resistencia obtenidos tras la rotura de estas primeras muestras se decidió repetir el ensayo llevando otras muestras de idénticas características y composición hasta una temperatura superior, de  $800^\circ\text{C}$ , esta vez introduciéndolas en el momento en el que la mufla se pone en marcha, desde  $0^\circ\text{C}$  hasta  $800^\circ\text{C}$  en 20 minutos (incremento de la máquina) y mantenida a  $800^\circ\text{C}$  durante una hora.

### 3.2.3.6 Ensayos de resistencia

Los ensayos de resistencia a flexión y a compresión se realizan con una probeta de cada amasada a la edad de 7 días, y con las dos probetas restantes de cada amasada a los 28 días de edad transcurridos dentro de la cámara de humedad, a  $20^\circ\text{C}$  y humedad relativa del 90% estable. Se realizaron además ensayos únicamente a compresión tras el gradiente térmico anteriormente descrito.

El proceso de desmoldado de las probetas elaboradas se lleva a cabo fácilmente ya que previamente en los moldes se aplicó un agente desencofrante para esta tarea.

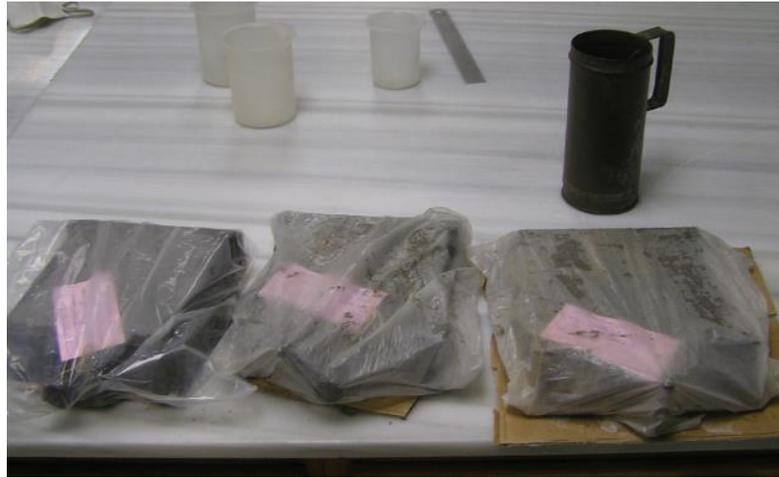


Figura 32: moldes sellados y etiquetados

Para el ensayo a flexión, que se realiza previamente porque la rotura produce dos mitades que serán objeto posteriormente de la rotura a compresión, se coloca la probeta de forma que las caras superior e inferior resulten las más planas, éstas son pues las que han estado en contacto con las paredes del molde durante el proceso fraguado. De esta forma, se garantiza una óptima transmisión de cargas entre los rodillos de la prensa y las caras planas de la probeta.

Según la norma UNE EN 196-1, la velocidad de este ensayo es de  $50 \pm N/s$  hasta la rotura.

La resistencia a flexión resulta de la expresión que nos da la misma norma:

$$R_f(Mpa) = \frac{1.5 * F_f * L}{b^3}$$

Donde:

**F<sub>f</sub>** es la máxima carga aplicada por la prensa, en N

**L** es 100mm, distancia entre los rodillos en el instrumento de carga

**b** es 40mm, ancho de la probeta en mm.



Figura 33: Instrumento de flexión



Figura 34: probeta rota a flexión

Una vez concluido el ensayo de rotura a flexión de todas las probetas, nos resultarán dos mitades por cada una ensayada a flexión como se ha comentado anteriormente. Se procede entonces a cambiar el instrumento de la prensa por uno destinado a realizar ensayos a compresión para este tipo de muestras.

La velocidad de la aplicación de la carga de compresión de la máquina es de  $2400 \pm 200$  N/s según la 196-1.



Figura 35: Rotura de probetas a compresión.



Figura 36: utensilio de compresión



## 4. Estado de la cuesti3n

En este apartado del presente trabajo se busca asentar una base normativa ya existente que permita ver la aplicaci3n de este residuo reciclado m1s cerca de la realidad, creando una hip3tesis de aplicaci3n normativa a partir de una actual que ya regule agregados reciclados.

### 4.1 An1lisis de normativa

Tras un an1lisis bibliogr1fico sobre producci3n y propiedades de 1rido reciclado, consultando estudios acerca de sus principales propiedades tanto f1sicas como qu1micas y aspectos acerca de la lixiviaci3n, y normativa existente, se recoge en las l1neas siguientes un resumen. Hay que se1alar que dada la amplia variedad de resultados distintos que se han podido obtener de la normativa de otros pa1ses analizada, se focaliza en este apartado del presente trabajo como objetivo principal el estudio de los 1ridos industriales actuales, procedentes de plantas de reciclaje de hormig3n. El gran abanico de resultados mencionado es debido a la calidad tan variable del 1rido reciclado seg1n cada estudio.

Actualmente, la normativa nacional regula el control de 1rido seg1n las siguientes propiedades, en orden decreciente de importancia:

- Granulometr1a
- Densidad
- Absorci3n
- Coeficiente de forma
- Coeficiente de los 1ngeles
- Part1culas blandas
- Resistencia a la helada, o al ciclo hielo-deshielo
- Part1culas ligeras
- Terrones de arcilla y otras impurezas
- Contenido de cloruros
- Contenido de sulfatos

Además, podemos añadir a la lista las siguientes propiedades, extraídas de normativas internacionales consultadas:

- Contenido de mortero adherido
- Contenido de álcalis

### 4.1.1 Granulometría

Con el árido reciclado, la granulometría depende del tipo de trituración llevada a cabo, casi exclusivamente. En Alemania se desarrolló el concepto de *Carácterística de la trituradora*, que ayuda a controlar el proceso de trituración y la granulometría del árido a través de una gráfica en la que se relaciona el llamado *Factor de reducción R* y el *porcentaje retenido* para todos los tamices. Dicho factor R es el cociente entre los tamices que retienen una misma cantidad de árido previamente y tras la trituración.

Como muestra la siguiente gráfica, a modo de ejemplo, el factor R de reducción para un porcentaje retenido del 35% resulta del cociente del tamiz que retiene un 35% antes de la trituración (el tamiz 59'5 mm) y el tamiz que retiene la misma cantidad tras la trituración (tamiz 9'9 mm).

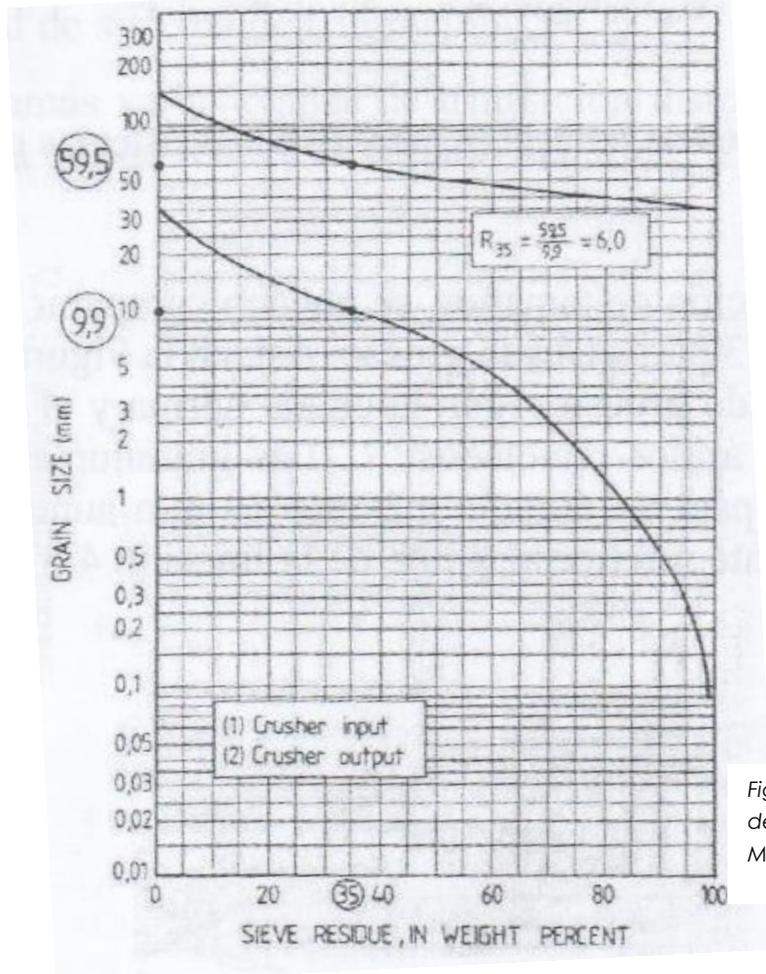


Figura 37: Obtención del factor de reducción de tamaño de un Sistema de trituración. Monografías CEDEX.

Aś se consigue evaluar la granulometŕa final del árido reciclado en funci3n de la granulometŕa inicial, permitiendo la decisi3n del tipo de sistema de triturado que mejor se ajuste a la granulometŕa objetivo, aś como la elecci3n de distintas fases de triturado (primaria, secundaria...etc).

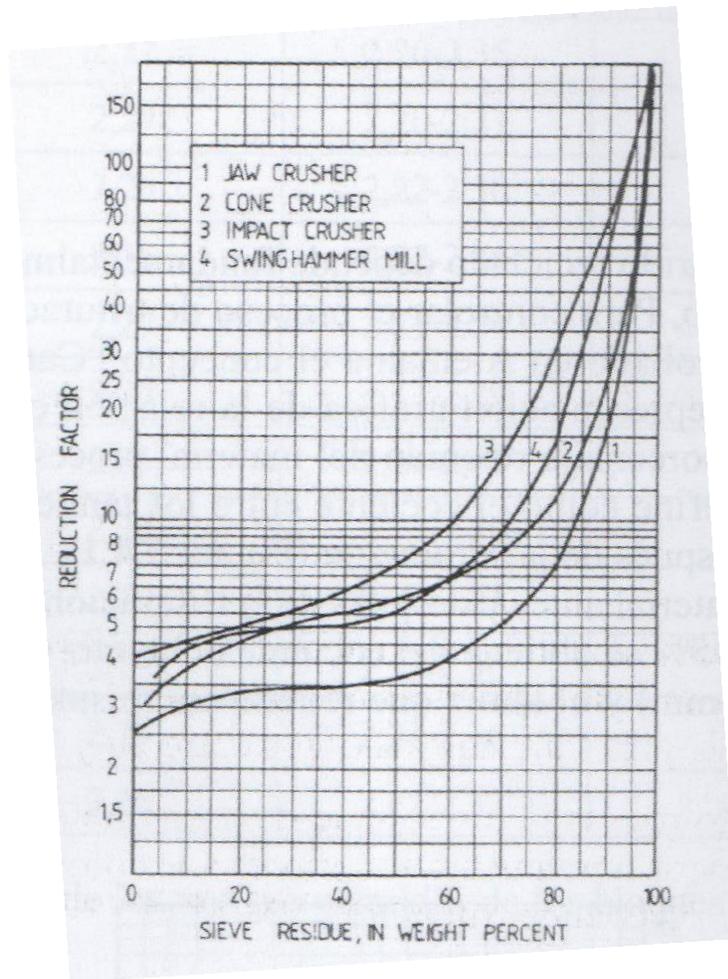


Figura 38: Factores de reducci3n para distintos sistemas de trituraci3n. Monografías CEDEX.

El contenido en partículas de tamaño inferior a 4 mm también resulta necesario de analizar. El árido que procede de vidrio reciclado resulta muy friable, o lo que es lo mismo, tiene tendencia a pulverizarse. Se puede determinar el contenido en partículas de tamaño inferior a 4 mm a partir de la norma *UNE-EN 933-2:96*.

La EHE establece un máximo porcentaje en peso del 10%, la norma alemana DIN 4226-100:2000 permite un máximo de 7% en volumen, y la belga y holandesa hasta un 10% también en volumen para los áridos inferiores a 4 mm.

### 4.1.2 Densidad.

La densidad del árido reciclado procedente de residuo de hormigón suele ser inferior a la del árido natural, a causa de la pasta de cemento adherida a las partículas. No ocurre así con el residuo procedente de vidrio reciclado. La determinación de la densidad de un árido reciclado puede llevarse a cabo según el procedimiento descrito en la *UNE-EN 1097-6:2001 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.*

Si bien la densidad del vidrio es conocida como  $2500 \text{ Kg/m}^3$  y la absorción de agua se puede tomar como nula (compacidad que tiende al 100%).

### 4.1.3 Absorción.

Como se ha indicado líneas arriba, la absorción de una partícula de vidrio se entiende como nula, dada la completa compacidad de este material. Aunque ya que se está comparando en este trabajo el árido objetivo, el de vidrio reciclado, con áridos procedentes de otros materiales reciclados (hormigón), se procede pues a detallar en qué debemos basarnos a la hora de determinar la absorción de un árido cualquiera que sea su naturaleza.

La Norma en la que se recoge el procedimiento para obtener la absorción de un árido es la misma que la del apartado anterior: *UNE-EN 1097-6:2001*, y el límite que establece la EHE para esta propiedad es del 5%.

Los factores más influyentes en la absorción del árido, en este caso, reciclado de hormigón, son:

*Tamaño:* a fracción más fina, mayor absorción

*Tipo de procesamiento:* en un procesamiento faseado se consigue una mejor calidad del árido, con una cada vez más descendiente absorción.

*Calidad del hormigón de origen:* si se trata de áridos que proceden de hormigón reciclado, la resistencia de este determina de forma indirectamente proporcional la absorción final del árido. Con el vidrio no ocurre lo mismo, ya que la estructura resulta igual de compacta en tamaños de partícula inferiores a 3 mm. Cabe destacar que pudiera ocurrir que el vidrio presentara una estructura celular discontinua, conteniendo células de tamaño 1 a 3 mm con una composición local diferenciada en composición y tensión superficial. Estas burbujas locales son producto del proceso de afinado en una planta de refundido del vidrio.

#### 4.1.4 Forma y textura.

En este aspecto, existe variedad de criterio según el método de ensayo que se vaya a emplear.

Coeficiente de forma, tamaño, índice de lajas e índice de angulosidad son los aspectos más importantes a estudiar de un árido para su viabilidad en la matriz cementícea.

En general, a menor tamaño de la partícula de árido, su forma es más angulosa.

Una cuestión muy importante es la relación que existe entre la absorción de un árido y su forma más o menos angulosa. Esta relación se da, ya que cuando un árido tiene una elevada absorción, el cemento quedará adherido a este en mayor cantidad, y tenderá a redondear todas sus aristas y vértices, quedando al final una partícula más redondeada que la de un árido con una baja absorción (como la del vidrio). La Norma UNE 7238:71 "Determinación del coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones" recoge estos conceptos. La EHE recomienda que el coeficiente de forma (relación entre la superficie total de las paredes en contacto con el aire exterior y el volumen total del grano) debe ser mayor a 0'20.

En el vidrio triturado, el coeficiente de forma predominante es  $D \leq 2d$  que significa que la dimensión mayor del grano es menor o igual al doble de la dimensión menor. Sin embargo, al menos 1/5 de la cantidad total del vidrio triturado para abordar parte analítica de este trabajo tiene un coeficiente de forma  $D > 2d$  o forma de bastón (laja). Este último resulta ser un árido con forma inadecuada que dificulta la obtención de resistencias adecuadas y que exige mayores cantidades de cemento. La UNE-EN 933-3:1997 limita la cantidad de este árido en un 35%.

#### 4.1.5 Coeficiente de los Ángeles.

En general, puede imaginarse que un árido que procede de un residuo reciclado tiene un coeficiente elevado de los Ángeles, puesto que en el ensayo se eliminaría toda la impureza adherida al árido objeto. El árido a utilizar, si ha pasado por un procesamiento de lavado, perdiendo así la mayor cantidad de sus impurezas, o si por el contrario, es un reciclado limpio y homogéneo presentaría pues un coeficiente los Ángeles despreciable, por lo que esta propiedad sólo es relevante según la procedencia y el estado del residuo que vaya a ser utilizado como agregado. Los ensayos para analizar esta propiedad queda recogido en la norma UNE-EN 1097-2:99 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación".

La EHE limita hasta un 40% el valor máximo del coeficiente los Ángeles.

Los factores que influyen en este coeficiente son:

- Tamaño del árido*: aumenta en tamaños finos de forma general, si no se trata de un residuo homogéneo y limpio, puesto que a menor tamaño, mayor cantidad de impurezas adheridas (como ocurre por ejemplo en el árido de hormigón reciclado, donde las fracciones finas presentan una gran cantidad de mortero adherido)
- Técnica de procesamiento*: al realizar varias fases para el procesado del árido, se consigue disminuir el coeficiente de los Ángeles de forma notable.
- Calidad del hormigón de origen*: de nuevo, como se ha visto en el apartado que explica la Absorción, el coeficiente de los Ángeles también depende de la calidad del hormigón origen si se trata de un árido de hormigón reciclado. A menor relación agua/cemento, el coeficiente también disminuye, por lo que existe una relación de proporción directa.
- Densidad*: según "Propiedades del árido reciclado. Uso en hormigón estructural. Monografías CEDEX" existe una correlación entre el coeficiente de los Ángeles y la densidad. La limitación máxima que marca la EHE del 40% corresponde a una densidad mínima de 2'32 Kg/dm<sup>3</sup> y una absorción máxima del 7%.

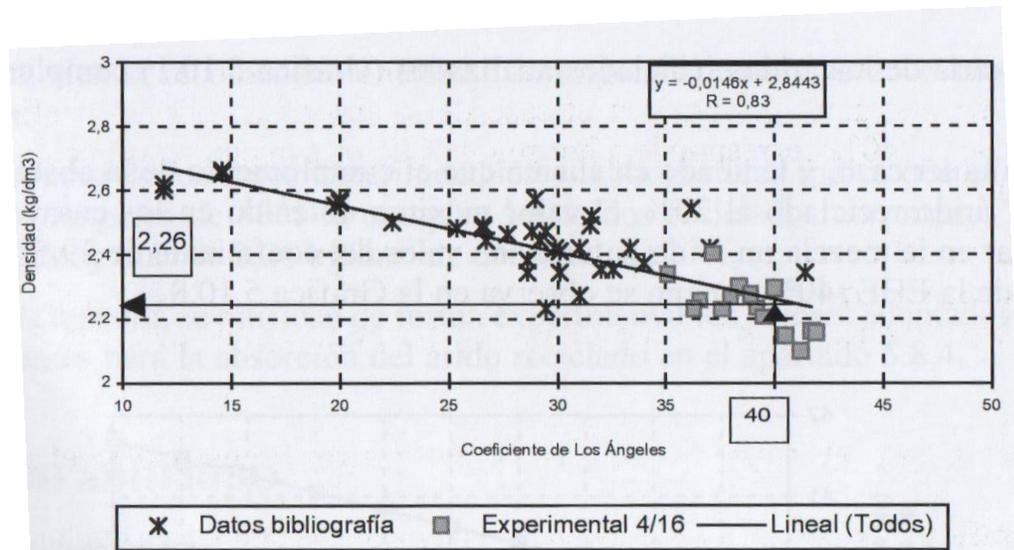


Figura 39: Relación entre el coeficiente de Los Ángeles y la densidad real. Monografías CEDEX.

### 4.1.6 Mortero adherido.

El árido procedente de hormigón reciclado tiene una cierta cantidad de mortero adherido que es necesaria controlar, no ocurre lo mismo con el árido producto del reciclado de vidrio.

Esta propiedad, como se ha indicado antes, está íntimamente relacionada con el coeficiente los Ángeles, densidad y absorción, y afectan a las propiedades *módulo de elasticidad*, *retracción* y *fluencia*, del hormigón definitivo.

#### 4.1.7 Partículas blandas.

Según la UNE 7134:58 "*Determinación de partículas blandas en áridos gruesos para hormigones*", la partícula blanda es la cual se ve afectada por el punzonamiento o deslizamiento del cilindro de cuzín.

Esta propiedad está limitada por la EHE en un 5% como valor máximo, que indica el porcentaje de mortero adherido (si, de nuevo, se tratara de un árido de hormigón reciclado). Una vez más, vinculada al coeficiente Los Ángeles, densidad y absorción. No resulta relevante para el sustituto del árido natural en el que se enfoca este trabajo puesto que si el vidrio procede, por ejemplo, de residuos de demolición junto con desechos de mortero y hormigón, no se encontrarían adheridos.

#### 4.1.8 Resistencia a ciclos hielo-deshielo.

Resulta probable que un árido con una alta absorción sea susceptible a la helada, o lo que es lo mismo, tenga una baja resistencia a los ciclos de hielo-deshielo, fruto de la porosidad que permite la entrada de agua y aparición de tensiones bien cuando esa agua se aproxima a su temperatura de solidificación (aumento aproximado de un 9% de su volumen), o bien cuando se aproxima a la de evaporación.

La norma UNE-EN 1367-1 recoge el procedimiento de ensayo para evaluar este comportamiento, que resulta despreciable en un árido compuesto de vidrio, al tener una compacidad que tiende al 100%.

#### 4.1.9 Partículas ligeras.

Esta propiedad si resulta importante para el tipo de árido que nos atañe. Se trata de determinar la cantidad de sustancias que pudieran producir manchas o burbujas en la superficie del hormigón final (impurezas que se presenten con un árido de vidrio sin lavar: plásticos, corcho, papel, etc).

Para la determinación de la misma se ha de utilizar el método normalizado según la UNE-EN 1744-1 "*Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. 1: Análisis químico*".

El ensayo consiste en sumergir una muestra desecada del árido en un líquido cuya densidad sea inferior a  $2 \text{ gr/cm}^3$ , como por ejemplo una disolución de cloruro de zinc ( $1,98 \text{ gr/cm}^3$ ). Las partículas que tengan menor densidad flotarán en la superficie, favoreciendo su separación incluso en una cadena industrializada de tratamiento de residuo.

Debido a que puede ocurrir que, al saturarse una partícula de impureza de densidad menor a la de la disolución, ésta decante, se puede abordar el ensayo con dos procesos distintos. El primero sería ensayar la muestra en estado desecado (según la norma arriba mencionada) y el segundo, ensayarla en estado de saturación (según la ASTM C-123). Éste segundo procedimiento hace necesario el permanente control de la densidad de la disolución y su rectificación cuando sea conveniente.

Para evitar estos inconvenientes lo idóneo es partir de una muestra seca y previamente preparada, lavada y desecada. Con la muestra desecada se evita la modificación de la densidad de la disolución. Además resulta más conservador el resultado de la determinación de partículas ligeras en una muestra seca frente al de una muestra saturada (debe dar un valor de partículas ligeras superior).

La naturaleza de estas partículas puede ser muy diversa como se ha indicado antes, desde corcho, hasta plásticos o papel son los elementos más frecuentes. La EHE limita el contenido de estas partículas en 1% como máximo en áridos gruesos.

#### 4.1.10 Terrones de arcilla y otras impurezas.

Ésta propiedad viene regulada según la UNE 7133:58 "*Determinación de terrones de arcilla en áridos para la fabricación de morteros y hormigones*" y resulta importante para un árido de hormigón reciclado, no siendo así para uno de vidrio reciclado debido a la nula porosidad del vidrio. Si existiera arcilla u otra sustancia natural adherida al vidrio, en una simple operación de tamizado se podría conseguir una separación limpia.

La detección de terrones de arcilla se lleva a cabo mediante el tacto y la vista, humedeciendo la muestra si fuera necesario para comprobar si un terrón es o no de naturaleza arcillosa.

La EHE limita en un 0'25% el contenido máximo de estos terrones, pero de nuevo, puede utilizarse un 100% de árido vítreo que casi con total probabilidad no se supera éste límite.

Solo existe una remota posibilidad de la presencia de arcilla en los residuos de vidrio, y es si el vidrio tuviera como origen una obra de demolición en la cual el montículo de escombros era heterogéneo, y el vidrio no ha pasado por un proceso de lavado o tamizado, pudiendo ahora sí presentar partículas de productos cerámicos (que en todo caso, serían estables ante la comprobación por humectación debido al proceso de cocido por el que han pasado durante su fabricación).

En cualquier caso, una criba puede solucionar el problema ya que no existiría adherencia entre una partícula vítrea y una arcillosa como se ha explicado antes..

Otras impurezas como yeso, tierra, madera, asfalto e incluso pinturas pueden presentarse frecuentemente cuando la materia prima reciclada procede de una demolición. La UNE-EN 933-7:99 "*Determinación del contenido de conchas*" es la que indica cómo determinar el contenido de impurezas de este tipo.

El BRE, *Building Research Establishment*, que es el órgano encargado de investigar, asesorar y desarrollar experiencias para sectores de la construcción del Reino Unido, limita en 1% el contenido máximo de metales, plásticos, yeso y tierra; y en 0'5% el contenido máximo de madera.

#### 4.1.11 Contenido de cloruros.

En función de la procedencia del hormigón que se vaya a usar para elaborar árido reciclado, éste puede presentar un contenido apreciable de cloruros, como por ejemplo los que proceden de obras marítimas o elementos expuestos a sales de deshielo para caminos y viales.

No ocurre así en el vidrio debido a su carácter inerte, por lo tanto evaluar esta propiedad carece de coherencia.

Para los hormigones del primer tipo, la norma UNE 80-217:91 "Método de ensayo de cementos. Determinación del contenido de cloruros, dióxido de carbono y alcalinos en los cementos" resulta de especial utilidad. La EHE establece la limitación del 0'05% en los áridos para hormigón armado y una cantidad menor, del 0'03% para los áridos destinados a hormigones pretensados.

#### 4.1.12 Contenido de sulfatos.

Ésta es otra propiedad que el carácter inerte del árido compuesto por vidrio hace que sea irrelevante. Sin embargo, dada la comparación que se está llevando a cabo en estas páginas entre éste árido y otro que resulta del reciclaje de hormigón se procede a analizar de forma sucinta cómo se regula la cantidad de sulfatos en áridos, sea de la naturaleza que sea.

El sulfato está presente cuando existen impurezas en el árido objeto de estudio. Dichas impurezas pueden ser yeso o mortero, cuando el escombros es de procedencia de la edificación. Los sulfatos presentes no producirán problemas en el nuevo hormigón, ya que ya se encontrarían combinados, pero se hará necesario evitar la presencia de impurezas como yeso que puede ser sinónimo de expansiones en el hormigón.

Una cuestión interesante es establecer una limitación de compuestos de azufre en vez de limitar los sulfatos solubles en ácido, quedándose uno de esta forma del lado de la seguridad. La norma noruega, y el BRE, así como numerosos estudios recogidos en las Monografías CEDEX así lo constatan. También, según estos, el contenido máximo de esta sustancia debe ser inferior al 1%. La EHE es más restrictiva, imponiendo la misma limitación que la del contenido de cloruros, a saber, 0'05% en áridos para hormigón armado y 0'03% para los áridos destinados a hormigones pretensados.

### 4.1.13 Contenido de álcalis.

Si alguna impureza del árido reacciona con los álcalis del cemento (reacción en ambiente húmedo) el resultado es un compuesto gelatinoso altamente expansivo, denominado etringita, que produce tensiones que a su vez conlleva una disminución notable de la resistencia y durabilidad del elemento de hormigón.

Según el BRE 433 "*Recycled aggregates*" se hace necesario evaluar la concentración de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) que pueda tener el árido. Puede hacerse un control sencillo de la siguiente manera:

Si se tiene la certeza de que el hormigón originario no ha sufrido expansiones por dicha reacción, se puede fijar el volumen V% de árido reciclado que se procede a usar en el hormigón nuevo (normalmente inferior al 50%). El contenido equivalente de álcali que se permite, en  $\text{Kg}/\text{m}^3$ , se debe reducir en un porcentaje similar al contenido en árido reciclado V%.

El uso de cementos adicionados (con cenizas volantes o escoria granulada) rebaja el riesgo de la aparición de esta reacción, ya que los hormigones fabricados con estos cementos son más impermeables en términos generales. Este tipo de cementos está indicado siempre por la norma japonesa ante la probable imposibilidad de controlar siempre la procedencia del árido reciclado. La EHE indica la restricción máxima del 0'6% en el contenido de alcalinos en el árido.

Como se indica previamente en el apartado "3.2.2.8 Reacción árido álcalis" el árido de vidrio que se va a emplear para el actual estudio tiene un tamaño de partícula lo suficientemente grande como para que el peligro de una reacción árido-álcali sea infundado.



## 5. Análisis de resultados

### 5.1 Análisis químico del vidrio

Para el análisis de resultados lo mejor es empezar con la caracterización que se hizo del vidrio.

En la siguiente tabla se detalla la composición de una muestra del vidrio empleado (de <125 micras de tamaño de partícula) gracias a la fluorescencia de rayos X llevada a cabo en el CITIUS.



Centro de Investigación, Tecnología e Innovación  
 Universidad de Sevilla  
 Avda. Reina Mercedes, nº 4-B, 41012 Sevilla,  
 Spain

### LABORATORIO DE RAYOS X

<b>MÉTODO DE MEDIDA:</b> CUANTI PIRITA (Elementos mayoritarios)													
<b>SOLICITANTE:</b> JAVIER ALEJANDRE													
<b>FECHA DE ENTRADA:</b> 06_07_17													
<b>FECHA DE ANÁLISIS:</b> 10_07_17													
<b>NOMBRE DE MUESTRA</b>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	PC	TOTAL
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	VJB	71,05	1,50	0,19	N.D.	0,76	11,38	13,19	0,72	N.C.	N.C.	N.D.	0,10

Tabla 27: Espectrómetro de fluorescencia de rayos X

Los resultados muestran una composición propia de un vidrio doméstico, caracterizado por un contenido en SiO<sub>2</sub> sobre el 70%, CaO sobre el 10% y NaO sobre 12-13%, el resto de componentes mayoritarios se encuentran en cantidades significativamente más bajas. Esta composición, unida a una muy baja pérdida por calcinación (PC), 0,10%, asociable al contenido en carbonatos (compuesto reactivo), garantiza un comportamiento químico muy estable.

### 5.2 Características organolépticas

En las siguientes fotografías puede comprobarse el aspecto de una probeta endurecida, interior y superficialmente. Cabe destacar que las partículas de vidrio se desprenden fácilmente de su matriz, ya que no existe vínculo de adherencia entre el cemento y el grano sino más bien un encapsulado geométrico por parte del cemento endurecido.



Figura 40: Aspecto de probetas endurecidas de 25% de sustitución de vidrio



Figura 41: Aspecto del interior de una probeta del 75% de vidrio.

### 5.3 Compacidad

#### 5.3.1 Diferencia de pesadas

En la siguiente tabla se recogen los pesos (en gramos) de cada una de las tres muestras correspondientes a cada amasada de dosificación a excepción de las correspondientes al 75% de sustitución que se desecharon por las bajas resistencias que aportaron, primero en estado desecado en estufa a 100° C durante 24 horas y después en estado saturado sumergidas durante el mismo tiempo. También se indica la media de peso de cada amasada.

Pdesecado	P1	P2	P3	Mpdés.
0%	452,4	446,8	445,4	448,20
25%	522,6	511,1	521,5	518,40
50%	538,6	542,9	545,1	542,20
Psaturado	P1	P2	P3	Mpsat.
0%	510,53	506,4	511,92	509,62
25%	572,92	563,06	574,48	570,15
50%	587,83	592,42	596,16	592,14

Tabla 28: Pesos (gr.) saturados y desecados de las muestras

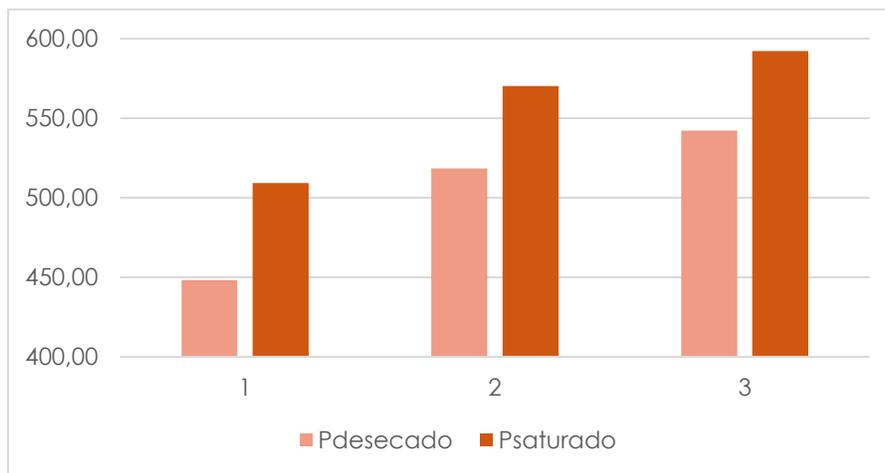


Tabla 29: Gráfica de pesos saturados y desecados de las muestras

En la Tabla X se puede ver de forma más visceral los datos de la tabla que la precede. Salta a la vista una mayor densidad de las muestras que tienen mayor contenido en árido vítreo en lugar de árido natural, llegando la muestra del 50% a diferenciarse en más de un 18% respecto de la muestra de referencia. También se denota una menor absorción de agua ligada a la sustitución de árido natural por vidrio, hasta un 18'7% menos absorción en las muestras con más vidrio. Estos resultados son

normales si tenemos en cuenta la mayor compacidad del agregado de sustituci3n (en torno al 100%) respecto a la del sustituido (0-80%), por la propia naturaleza del vidrio.

### 5.3.2 Ultrasonidos

Los resultados del ensayo con pulsos ultras3nicos son los que siguen:

Ultrason. $\mu$ s	Probeta 1				
	Transver 1	Transver 2	Transver 3	Mtransv.	Longitudinal
0%	18,1	17,7	17	17,60	61,8
25%	14,2	13,9	14,3	14,13	52
50%	13,5	13,5	13,4	13,47	46,9
Probeta 2					
	Transver 1	Transver 2	Transver 3	Mtransv.	Longitudinal
0%	19,2	17,7	18	18,3	62,3
25%	14,3	14,1	14,3	14,23	51,6
50%	13	13,2	13	13,07	47
Probeta 3					
	Transver 1	Transver 2	Transver 3	Mtransv.	Longitudinal
0%	18,5	18,3	17,7	18,17	61,2
25%	14,3	14,6	14,2	14,37	53
50%	13,2	13,1	13,2	13,17	47,7

Tabla 30: Resultados de ensayos de ultrasonidos

En ellos se muestra el tiempo (en microsegundos) que tarda el pulso en atravesar a la probeta segun el caso, longitudinal o transversalmente. Por lo tanto, a mayor velocidad, mayor compacidad de la muestra, ya que el pulso viaja m1s r1pidamente a trav1s del mortero o del 1rido que a trav1s del aire. Hay que indicar que las probetas venían de la estufa, de haber estado durante 24 horas a 100°C para evitar falsear los resultados por saturaci3n de los poros. Con estos datos se elaboran las tablas siguientes:

%Porosidad	P1	P2	P3	%Pmedia	%Compacidad
0%	12,85	13,34	14,93	13,71	86,29
25%	9,63	10,17	10,16	9,98	90,02
50%	9,14	9,12	9,37	9,21	90,79

Tabla 31: porosidad y compacidad de las muestras

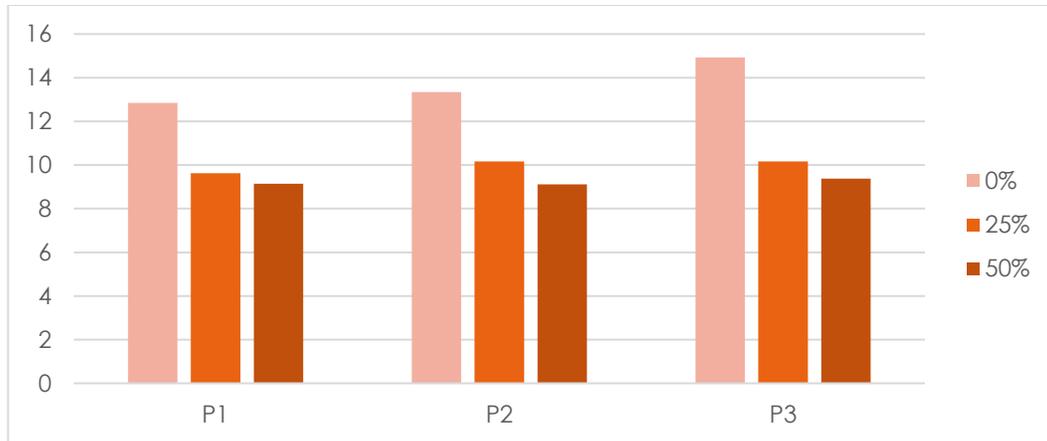


Tabla 32: Índice de porosidad de las muestras

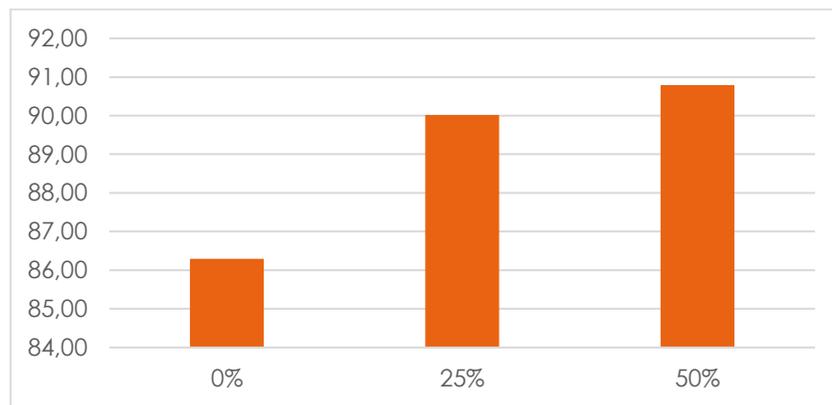


Tabla 33: Medias del índice de compacidad de las muestras

Se puede concluir con que el aumento de la proporción de vidrio en el mortero conlleva un incremento en la compacidad (bajando por tanto su porosidad), como se ha demostrado con las pesadas y los ensayos con ultrasonidos.

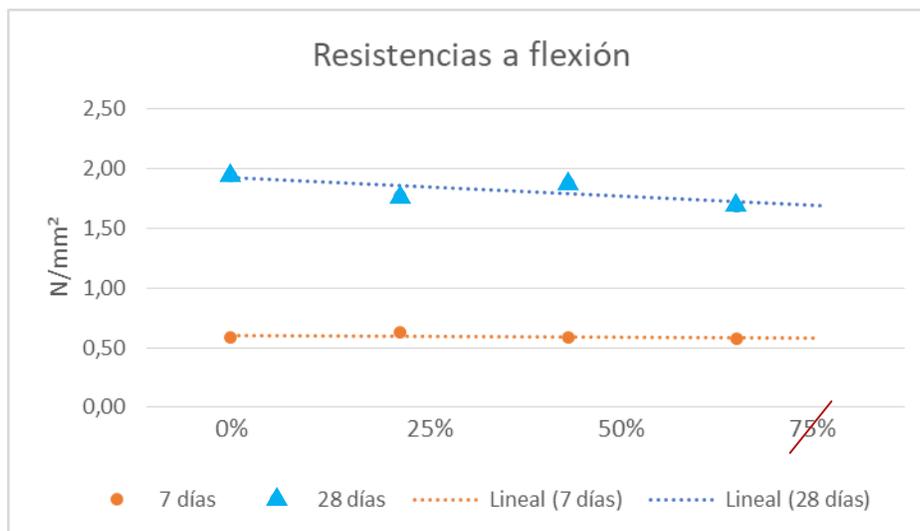
Tal y como se ha explicado, si se sustituye un componente singular (árido) por otro que tenga mayor compacidad, la compacidad del conjunto asciende, o lo que es lo mismo, desciende su porosidad.

## 5.4 Resistencias mecánicas

### 5.4.1 Resistencia a flexión

Se presentan ahora las resistencias a flexión (en N/mm<sup>2</sup>) que demostraron las probetas a los 7 y 28 días en su rotura.

R.Flexión	7 días	28 días	M28
0%	0,59	0,94	1,94
		1	
25%	0,63	0,86	1,77
		0,91	
50%	0,58	0,94	1,88
		0,94	
75%	0,58	0,83	1,68
		0,86	

Tabla 34: Res. flexión de las muestras a los 7 y 28 días en  $N/mm^2$ .Figura 42: Gráfica de las res. flexión de las muestras a los 7 y 28 días en  $N/mm^2$ .

Se aprecia cómo con la incorporación del residuo de vidrio la flexión capaz de absorber un elemento de este material es menor, hasta un 13'4% si tiene el 75% del árido natural sustituido por vidrio triturado. Esto puede ser debido a la decadente adherencia entre las interfaces cemento – vidrio.

### 5.4.2 Resistencia a compresión

Es el turno de los resultados arrojados cuando las probetas se sometieron a compresión. También en  $N/mm^2$  y a los 7 y 28 días.

R.Compr.	7 días	M7	28 días	M28
0%	13,49	13,09	19,64	19,16
			19,15	
	12,69		19,29	
			18,54	
25%	12,94	12,62	18,93	18,30
			19,10	
	12,29		18,38	
			16,80	
50%	12,91	12,71	20,36	18,89
			17,93	
	12,51		18,49	
			18,79	
75%	11,37	10,50	19,21	17,06
			16,57	
	9,62		17,33	
			15,12	

Tabla 35: Res. compresión de las muestras a los 7 y 28 días en N/mm<sup>2</sup>.

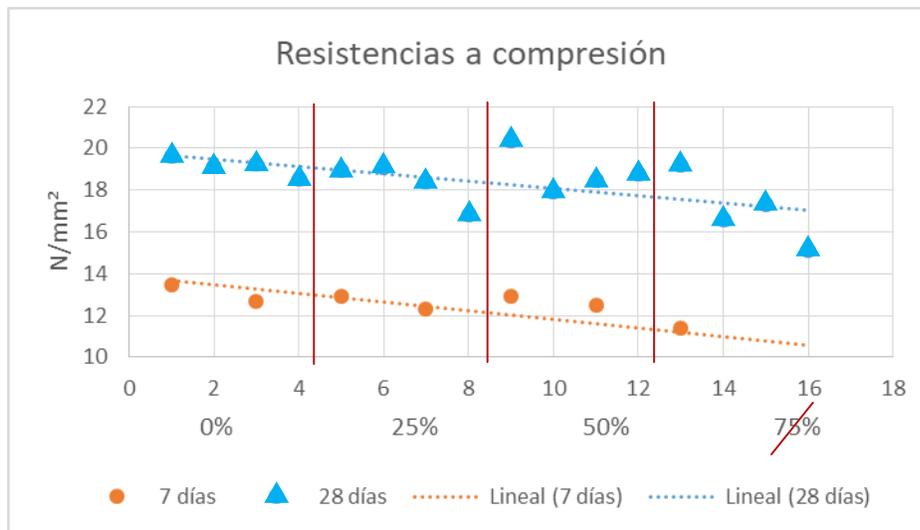


Figura 43: Gráfica de las res. compresión de las muestras a los 7 y 28 días en N/mm<sup>2</sup>.

Se comprueba cómo en general esta resistencia decrece con la cantidad de vidrio machacado. Esto ocurre en mayor medida cuando la sustitución es del 75%, evidenciándose también una mayor dispersión en los resultados de las muestras con mayor sustitución.

Los resultados de las probetas de esta última proporción se desecharon debido a la falta de resistencia. Contando ahora con las dosificaciones testigo, 25% y 50% se ve, como se ha dicho antes, que la resistencia que pueden aportar las muestras es menor cuanto mayor la presencia de vidrio, pero realmente no son diferencias significativas, apenas un 4'49% como se puede apreciar:

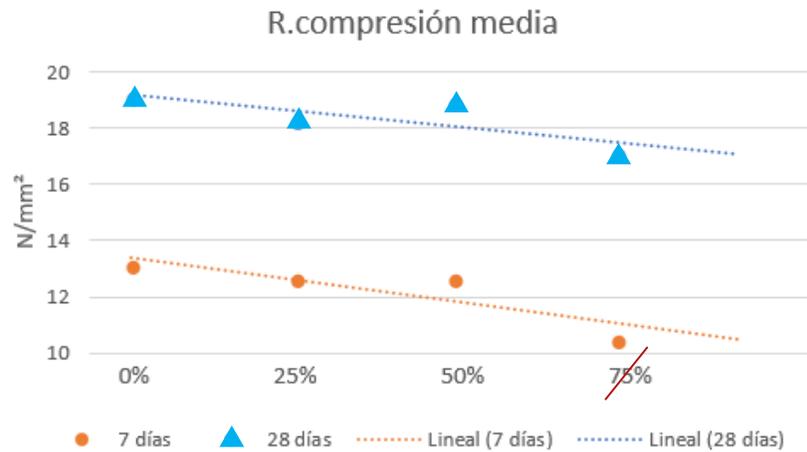


Figura 44: Gráfica de las medias de res. compresión de las muestras a los 28 días en N/mm<sup>2</sup>.

La merma de resistencias probablemente es debida a la mencionada falta de adherencia entre el cemento y el grano de vidrio.

## 5.5 Estabilidad térmica

Como se explica en el apartado "3.2.3 Procedimiento experimental", se quiso comprobar la estabilidad al fuego de este mortero fundamentalmente por la estabilidad sabida del vidrio ante altas temperaturas y también por los resultados arrojados por los autores de los estudios analizados en este trabajo que evalúan esta capacidad refractaria [27] y [64].

Tras haber permanecido una hora en mufla a 600°C, las probetas de 28 días de edad se dejaron enfriar al aire y se sometieron de nuevo a cargas de flexión y compresión.

El mismo número de amasadas con las mismas dosificaciones se reelaboraron para repetir el ensayo, esta vez introduciendo las muestras con la mufla fría y una vez dentro, poniéndola en marcha hasta una temperatura máxima de 800°C mantenidos durante una hora. De esta forma se busca complementar los datos arrojados en la primera parte de este apartado de estabilidad térmica.

R.Flexión	28 días	M28
0%	0,13	0,21
	0,25	
	0,26	
25%	0,58	0,44
	0,51	
	0,24	
50%	0,74	0,51
	0,54	
	0,25	

R.Compr.	28 días	M28
0%	5,04	5,20
	5,71	
	6,84	
	7,43	
	3,47	
	2,71	
25%	8,91	14,60
	11,9	
	15,86	
	13,87	
	18,56	
	18,51	
50%	21,58	18,81
	17,04	
	17,9	
	15,63	
	20,74	
	19,95	

ARRIBA Tabla 36: Res. flexión en N/mm<sup>2</sup>.de las muestras tras gradiente térmico 600°C

DERECHA Res. compresión en N/mm<sup>2</sup>.de las muestras tras gradiente térmico 600°C.

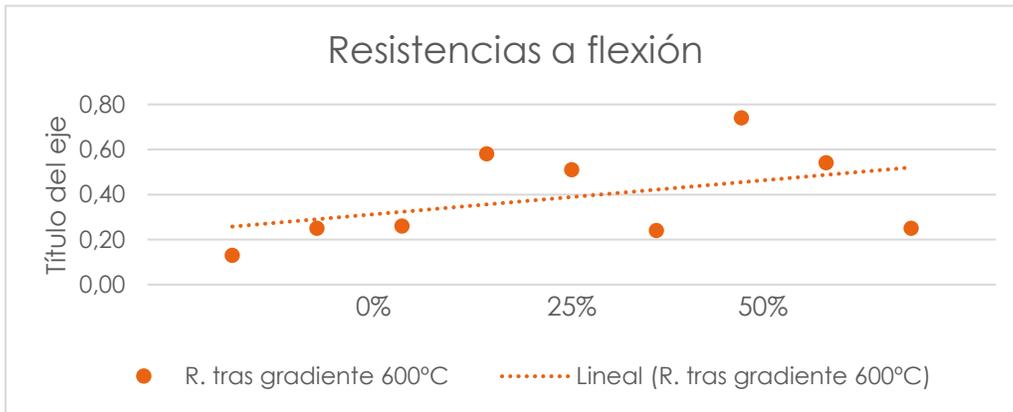


Figura 45: Gráfica de las res. a flexión de las muestras tras gradiente 600°C.

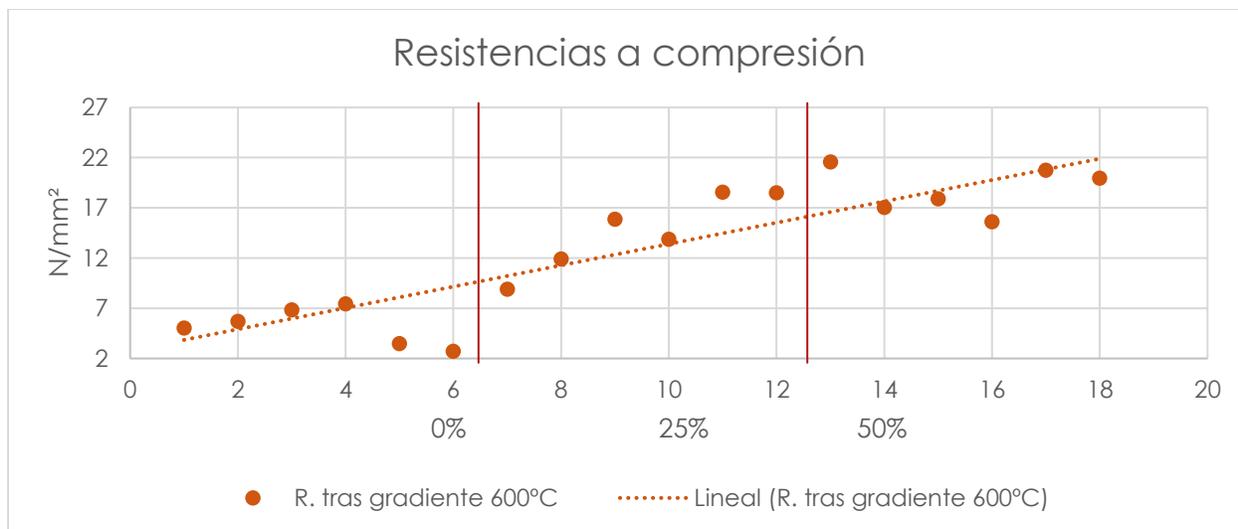


Figura 46: Gráfica de las res. a compresión de las muestras tras gradiente 600°C.

Se ve una clara mejora del comportamiento de una mezcla con sustitución por vidrio del agregado natural respecto a otra sin esta sustitución, evidenciando el buen comportamiento del árido vítreo hasta temperaturas de **600°C**. En la siguiente gráfica se pueden comparar estos valores con los obtenidos en los ensayos sin haber estresado térmicamente a las probetas.

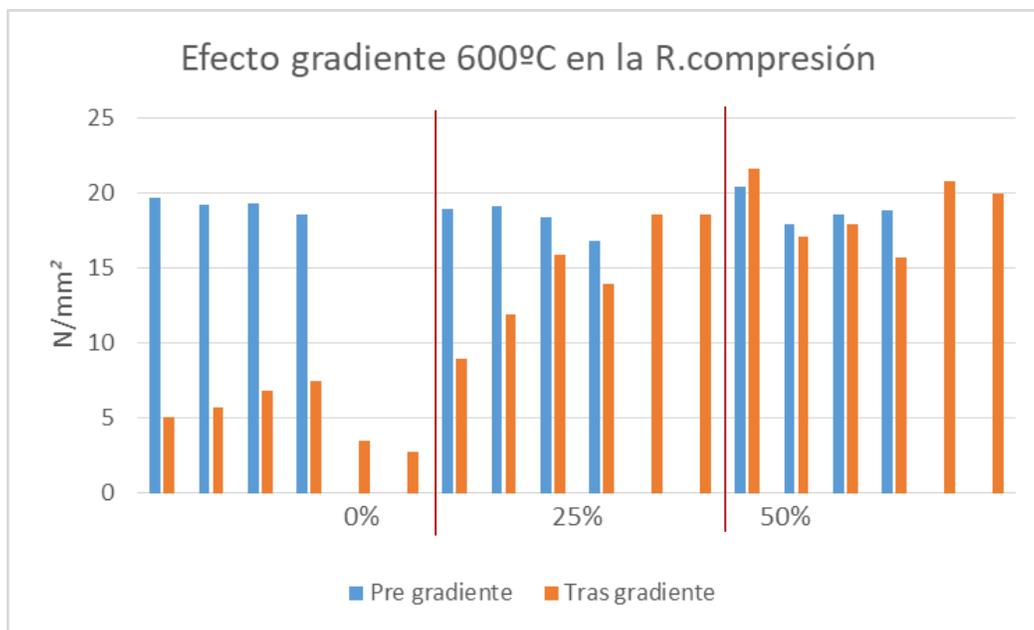


Tabla 37: comparación de las res. a compresión de las muestras pre- y tras gradiente 600°C.

A efectos de entendimiento de la gráfica, hay 4 muestras pre gradiente por cada 6 post gradiente debido a que en las primeras hubo una rotura por amasada a la edad de los 7 días

que no hubo en las segundas. En la siguiente se simplifican estos valores con sus respectivas medias.

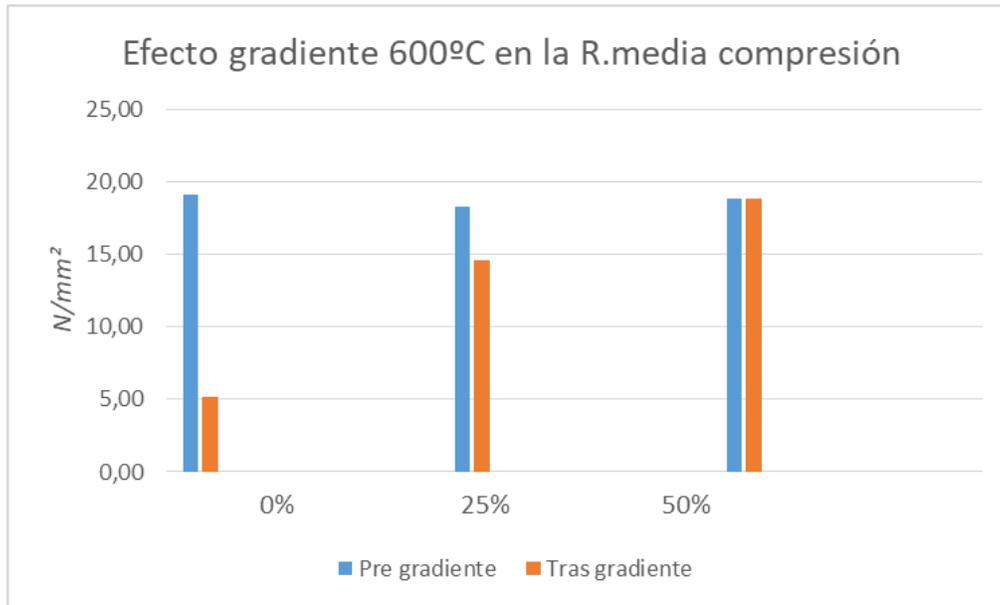


Tabla 38: comparación de las medias de res. a compresión de las muestras pre- y tras gradiente 600°C.

A continuación se muestran los datos del último análisis relacionado con este aspecto, llevando esta vez las muestras hasta una temperatura máxima de **800 °C** durante una hora.

R.Flexión	28 días	M28
0%	0,125	0,06
	0	
	0,0625	
25%	0,0875	0,10
	0,0750	
	0,1500	
50%	0,2375	0,24
	0,1813	
	0,2938	

ARRIBA Tabla 36: Res. flexión en N/mm².de las muestras tras gradiente térmico 800°C

DERECHA Res. compresión en N/mm².de las muestras tras gradiente térmico 800°C.

R.Compr.	28 días	M28
0%	1,3750	1,45
	1,6375	
	1,7500	
	1,3313	
	1,4250	
25%	1,2063	2,69
	2,7563	
	2,4063	
	1,9188	
	2,8625	
50%	2,8188	6,56
	3,4000	
	5,4063	
	6,2750	
	7,2250	
50%	7,0750	6,56
	7,1438	
	6,2250	

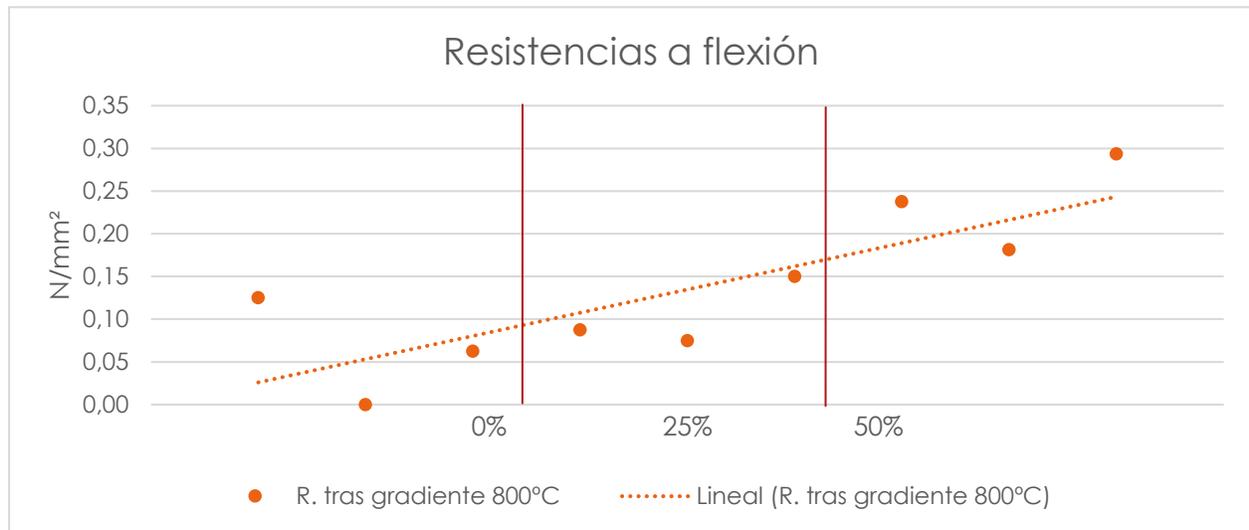


Tabla 39: Resistencias a flexión tras gradiente térmico de hasta 800°C.

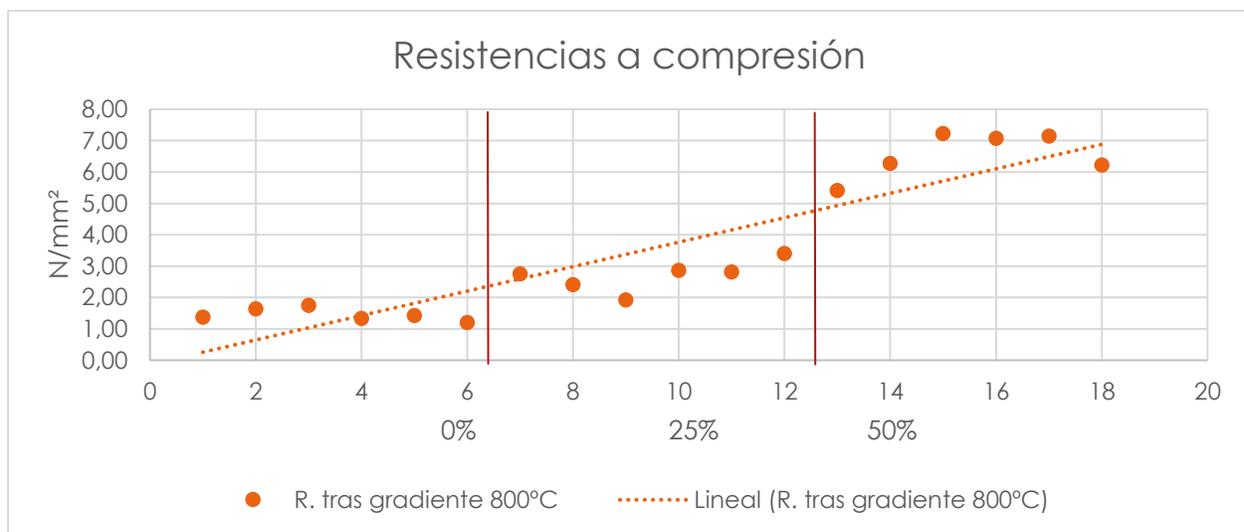


Tabla 40: Resistencias a compresión tras gradiente térmico de hasta 800°C.

Las muestras con más vidrio vuelven a demostrar una ventaja térmica frente a las muestras de referencia. Además cabe señalar que estas últimas presentaban una fractura más frágil y violenta que las que contenían vidrio.

En las siguientes imágenes se puede apreciar cómo el calor se ha distribuido de forma diferente en las muestras, según se trate de una con mayor o con menor contenido en vidrio. Se puede ver cómo en la muestra de referencia el núcleo presenta un color salmón uniforme, producto de la alta temperatura alcanzada en la zona, mientras que en la muestra con 25% de vidrio este tono solo se presenta en una zona superficial y por último, en la del 50% no se aprecia dicha

tonalidad. Por lo tanto, resulta claro el valor de la incorporación de vidrio como sustitución parcial del agregado natural para elementos de los que se espera un comportamiento refractario o estable ante temperaturas relativamente altas.



*Figuras 42 y 43: comparación de la tonalidad del color según la distribución de calor, a la IZQUIERDA una muestra sin vidrio, en el CENTRO una muestra con una sustitución del 25%, y a la DERECHA una muestra con una sustitución del 50%.*



## 6. Conclusiones

Tras analizar los resultados obtenidos de todos los ensayos que se han realizado, se puede concluir con las siguientes premisas:

- La estabilidad química del árido reciclado de vidrio sodocálcico le adecúa para ser incorporado en morteros tanto como sustituto del árido natural como del cemento (como se ha visto en investigaciones analizadas).
- Las resistencias mecánicas del mortero elaborado con sustitución parcial del árido natural por vidrio se ven afectadas de manera negativa. En los ensayos realizados en este trabajo se llega a la conclusión de que una sustitución del 50% conserva beneficios de su presencia, mientras que las desventajas son mínimas.
- La merma de resistencias es debida a la falta de adherencia en la interfaz vidrio-cemento, por lo que habría que trabajar en esta dirección para solventarlo.
- La compacidad del mortero aumenta con la cantidad de árido sustituido, conllevando ventajas ligadas a la durabilidad.
- La estabilidad del mortero frente a temperaturas de hasta 600°C también aumenta con la cantidad de vidrio. Habría que trabajar en esta dirección para saber si alguna cualidad refractaria sería finalmente de aplicación.
- A temperaturas superiores, de hasta 800°C, el mortero con vidrio de sustitución sigue respondiendo mejor que el mortero tradicional, sin embargo ya sí se refleja en las tablas un descenso muy importante de las propiedades mecánicas.
- Según se ha analizado de otros estudios, la sustitución de árido por agregado vítreo (y su ligado aumento de densidad) en morteros aumenta la capacidad aislante frente a radiación X del material.
- Dado que el cemento es uno de los materiales mundialmente más demandados (pese a la actual crisis), el vidrio vería una fuente potencial de reciclado en la incorporación a morteros.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ahmad Shayan, Aimin Xu. Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 81-89.
- [2] Álvarez J. L. Empleo del vidrio volcánico en el hormigón celular. División de Materiales CTDMC La Habana (1996).
- [3] Barradas Rebolledo A. Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales, estado del arte.. (2009).
- [4] Bashar Taha, Ghassan Nounu. "Properties of concrete contains mixed color waste recycled glass as sand and cement replacement". *Construction and Building Materials* 22 (2008)
- [5] Bastami M, Khiabani A, Kordi M. Mechanical properties of high strength concrete at high temperatures, in: *Proceedings of the fourth Weimar workshop on high performance concrete*. 1995 237-254.
- [6] Bazant, Kaplan. *Concrete at High Temperature: Material Properties and Mathematical Models*. Longman Group Limited 1996.
- [7] Bignozzi, Saccani. Waste glass from separated collection: an ecosustainable addition to new building materials. *Waste Management* 29 (2009) 329-334.
- [8] Cassar, Camilleri. Utilization of imploded glass in structural concrete. *Construction and Building Materials* 29 (2012) 299-307.
- [9] Centro del Producto Reciclado. *Reciclaje y productos reciclados : situación del sector en la Comunidad de Madrid.- Madrid :, 2001.*

[10] Chien-Chin Wang, Her-Yung Wang. Assessment of the compressive strength of recycled waste LCD glass concrete using the ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials* 137 (2017) 345-353.

[11] Chiras, Daniel D. - *Environmental science : action for a sustainable future.*- Redwood City, California [etc.] : Benjamin Cummings, 1994.

[12] Connelly J. H., Lopata D. J. CRTs and TV picture tubes. *Engineering Materials Handbook 4: Ceramics and Glasses* (1991) 1038-1044.

[13] Coto J. A. *El vidrio en la construcción, situación actual y orientación de la I+D.* (1992).

[14] Cree D., Green M., Noumowé A.. Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: a review.. *Construction and Building Materials* 45 (2013) 208-223.

[15] de Castro, Sara, de Brito, Jorge. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates, *Journal of Cleaner Production* 41 (2013) 7-14.

[16] Dehn F, König G. Fire resistance of high performance concrete in: proceedings of the RILEM International Workshop (1994) 237-242.

[17] Diederichs, Jumppanem, Penttala. Material properties of high strength concrete at elevated temperatures in Helsinki. 1998.

[18] Ecovidrio. Informe de sostenibilidad de Ecovidrio (2015).

[19] Fundación Cajamar. *El sector de los residuos sólidos urbanos en España.* Almería 2007.

[20] Gable Cate, Shireman Bill. Computer and electronic product stewardship: are we ready for the challenge? *Environment and Quality Management.* 11 (2001) 35-45.

[21] Galán Arboledas. Utilización de nuevas materias primas y residuos industriales para mejorar las posibilidades de uso de los materiales cerámicos del área de Bailén (Jaén). *Materiales de Construcción* 63 (2013) 553-568.

[22] Gedesma, 60 preguntas y respuestas básicas sobre residuos.- Madrid : 2002.

[23] Gerward, Leif. Gamma ray shielding properties of  $\text{CaO-SrO-B}_2\text{O}_3$  glasses. *Radiation Physics and Chemical* 72 (2005) 225-228.

[24] Gil Bercero, J. R. ; Gómez Antón, M<sup>a</sup> Rosa .- Educación medioambiental : reciclaje y recuperación de residuos domésticos.- Madrid : UNED, 1995.

[25] Gil Bercero, J. R. ; Gómez Antón, M<sup>a</sup> Rosa .- Gestión y tratamiento de residuos domésticos I. Video con guía de estudio.- Madrid : UNED, 1996.

[26] Gil Bercero, J. R. ; Gómez Antón, M<sup>a</sup> Rosa .- Los plásticos y el tratamiento de sus residuos.- Madrid : UNED, 1997.

[27] Hasan Ali, Youkhanna Zayia Dinkha, J. Haido. Mechanical properties and spalling at elevated temperature of high performance concrete made with reactive and waste inert powders. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 20 (2017) 536-541.

[28] Ilker Bekir Topçu, Mehmet Canbaz. Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 267-274.

[29] Infante Bazán Maria Eugenia. Proyecto Fin de Grado: Estudio y Caracterización de los áridos reciclados. 2014.

[30] Ioannidis, Zouboulis. Selective removal of lead and bromide from a hazardous industrial solid waste using Limited Acid Demand and Separation Factor at ambient conditions. *Journal of Hazardous Materials*. 131 (2010) 110-115.

[31] Kamali M, Ghahremaninezhad A. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. Mahsa Kamali, Ali Ghahremaninezhad. *Construction and Building Materials* 98 (2015) 407-416.

[32] Katrin H, Viviani M, Denarie E, Brühwiler E. Development of the mechanical properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 1362-1370.

[33] Kirdsiri, Kaewkhao, N. Chanthima, P. Limsuwan. Comparative study of silicate glasses containing  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$  and  $\text{BaO}$ : radiation shielding and optical properties. *Annals of Nuclear Energy* 38 (2011) 1438-1441.

[34] Kodur V. Properties of concrete at elevated temperatures. *Civil Engineering* (2014) 1-15.

[35] Lee, Chang, Fan, Chang. An overview of recycling and treatment of scrap computers. *Journal of Hazardous Materials* 114 (2009) 93-100.

[36] Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos (BOE de 22 de Abril de 1998).

[37] Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases (BOE de 25 de Abril de 1997).

[38] Lim Sheau Hooi, Phang Jia Min Potential of substituting waste glass in aerated light weight concrete.. *Procedia Engineering* 171 (2017) 633-639.

[39] Marco J, García E, Más M. I., Alcaraz V., Luizaga A.. Estudio de la resistencia a compresión de morteros fabricados con conglomerante compuesto de polvo de vidrio. *Informes de la Construcción* 64 (2012) 529-536.

[40] Metin Husem. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Safety Journal* 41 (2006) 155-163.

[41] Min Li, Chun Qian, Wei Sun. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 1001-1005.

[42] M° de Fomento. Medio ambiente en España 1995.- Madrid, 1996.

[43] M° de Medio Ambiente. Medio ambiente en Europa : El Informe Dobříš.- Madrid , 1998.

[44] M° de Medio Ambiente. Medio ambiente en España 2000.- Madrid , 2001.

[45] Nebel, Bernard J. ; Wright Richard T. .- Environmental Science.- Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall, 1993.

[46] Nwaubani, Poutos. The influence of waste glass powder fineness on the properties of cement mortars. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management* (2013).

[47] Patel (M.Sc thesis), Comparative Study of Waste Glass Powder as Pozzolanic Material in Concrete Department of Civil Engineering National Institute of Technology Rourkela 2012.

[48] Pawel Walczak, Jan Malolepszy, Reben Manuela, Pawel Szymanski, Karol Rzepa. Utilization of waste glass in autoclaved aerated concrete. *Procedia Engineering* 122 (2015) 302-309.

[49] Pierre Richard, Marcel Cheyrezy. Composition of reactive powder concretes, *Cement and Concrete Research* 25 (1995) 1501-1511.

[50] Sadiqul Islam, Rahman, Nayem Kazi. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment* (2016).

[51] Seoáñez Calvo, Mariano .- Residuos : problemática, descripción, manejo, aprovechamiento y destrucción .- Madrid : Mundi-Prensa, 2000.

[52] Shayan Ahmad, Xu Aimin Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: a field trial on concrete slabs.. Cement and Concrete Research 36 (2006) 457-468.

[53] So Yeong Choi, Yoon Suk Choi, Eun Ik Yang. Effects of heavy weight waste glass recycled as fine aggregate on the mechanical properties of mortar specimens.. Annals of Nuclear Energy 99 (2017) 372-382.

[54] Spiesz, Rouvas, Brouwers. Utilization of waste glass in translucent and photocatalytic concrete. Construction and Building Materials 128 (2016) 436-448.

[55] Stephen E. Musson, Yong-Chul Jang, Timothy G. Townsend,\* and Il-Hyun Chung. Characterization of lead leachability from cathode ray tubes using the toxicity in sustainability. Technology Forecasting Society 70 (2003) 4778-4784.

[56] Techobanoglous, George ; Theisen, Hilary ; Vigil , Samuel .- Gestión integral de residuos sólidos.-Madrid : Mc Graw-Hill, 1996.

[57] Terro Mohamad J. Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. Building and Environment 41 (2006) 633-639.

[58] Tung C, Poon S. Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes. Material Designs 32 (2011) 2675-2684.

[59] Tung- Chai Ling, Chi-Sun Poon, Shi-Cong Kou. Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures. Cement and Concrete Composites 34 (2012) 265-272.

[60] Tung-Chai Ling, Chi-Sun Poon, Wai-Shung Lam, Tai-Po Chan, Karl Ka-Lok Fung. Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation-shielding applications. Journal of Hazardous Materials 199-200 (2012) 321-327.

[61] Turk, Jonathan ; Turk, Amos .- Environmental Science.- Philadelphia : Saunders, 1988.

- [62] Universidade da Coruña. Tratamiento de residuos sólidos urbanos. A Coruña :, 2001.
- [63] Xiaoyong Li, Fanjie Bu. Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 1999-2005.
- [64] Xin Yu, Zhong Tao, Tian-Yi Song, Zhu Pan Performance of concrete made with steel slag and waste glass. *Construction and Building Materials*. 114 (2016) 737-746.
- [65] Yahya Jani, Hogland William. Waste glass in the production of cement and concrete. A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2 (2014) 1767-1775.
- [66] Yüksel Isa, Siddique Rafat, Ozkan Omer. Influence of high temperature on the properties of concrete made with industrial by-products as fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 967-972.
- [67] UNE-EN 196-1:05 "Métodos de ensayo de cementos. 1: Determinación de resistencias mecánicas."
- [68] UNE-EN 933-2:96 "Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. 2:Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas."
- [69] UNE-EN 933-3:97 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. 3:Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas."
- [70] UNE-EN 933-7:99 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 7: Determinación del contenido en conchas."
- [71] UNE-EN 998-2:12 "Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería."

[72] UNE-EN 1097-2:10 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. 2:Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación."

[73] UNE-EN 1097-6:14 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. 6:Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua."

[74] UNE-EN 1367-1:08 "Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. 1:Determinación de la resistencia a ciclos de hielo y deshielo."

[75] UNE-EN 1744-1:99 "Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. 1:Análisis químico."

[76] UNE 7133:58 "Determinación de terrones de arcilla en áridos para la fabricación de morteros y hormigones."

[77] UNE 7134:58 "Determinación de partículas blandas en áridos gruesos para hormigones."

[78] UNE 7238:71 "Determinación de coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones."