

UNIVERSIDAD DE SEVILLA



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE LA
EDIFICACIÓN**

Departamento de Construcciones Arquitectónicas II

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN INTEGRAL DE LA
EDIFICACIÓN**

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**Incorporación de vidrios reciclados en la
fabricación de nuevos materiales de bajo
impacto ambiental.**

**Autora: Yanet Corona Macías
Tutores: Dr. Juan Jesús Martín del Río
Dr. Juan Manuel Alducin Ochoa**

**Sevilla
Septiembre 2022**

UNIVERSIDAD DE SEVILLA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE LA
EDIFICACIÓN
Departamento de Construcciones Arquitectónicas II

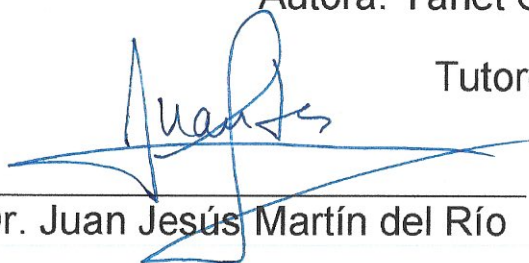
MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN INTEGRAL DE LA
EDIFICACIÓN

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Incorporación de vidrios reciclados en la
fabricación de nuevos materiales de bajo
impacto ambiental.

Autora: Yanet Corona Macías

Tutores:



Dr. Juan Jesús Martín del Río



Dr. Juan Manuel Alducin Ochoa

Sevilla
Septiembre 2022

“La tierra no es como muchos piensan, una herencia de nuestros padres. Es cuando menos, un préstamo de nuestros hijos”

José Martí

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Juan Jesús Martín del Río, por adentrarme en este campo totalmente nuevo para mí y hacerme parte de esta investigación, la cual me ha resultado no sólo interesante, sino también muy gratificante. Gracias por su paciencia y por sus consejos que hicieron que este trabajo tuviera una mayor calidad.

A Juan Manuel Alducin Ochoa, mi querido Juanma, por su dedicación, sentir tanta pasión por su profesión, estar siempre dispuesto a transmitir sus saberes y ayudar en lo que hiciera falta, por su bondad, por sus palabras de aliento, por acompañarme y hacerme más sencillo el camino.

A Vicente Flores Alés, por ser también parte de esta investigación, por sus comentarios siempre precisos y acertados que contribuyeron a la obtención de un mejor resultado.

A Marta Torres González, por su ayuda en el laboratorio, por su dulzura, alegría y compañerismo que hicieron más grato el trabajo.

A Catalina, por ser la primera amiga que tuve en el máster, la mejor compañera que se podría tener en el laboratorio, por ser parte de este trabajo y porque estos resultados también son suyos.

A todos los profesores del máster que contribuyeron a hacerme crecer como profesional y ser humano y a todos mis compañeros y amigos que compartieron conmigo en esta etapa, por hacer más agradable el recorrido y por hacerme sentir en familia a pesar de estar lejos de mis seres queridos.

A mis tíos, porque sin ellos no podría haber emprendido este camino, por tenderme la mano cuando los necesité.

A mis abuelos, los que podré volver a abrazar si dios quiere y a los que dejaron de estar físicamente durante este recorrido, pero sé que me verán llegar a la meta desde donde estén. A Raúl, por ser abuelo de corazón y haber contribuido también para que llegara hasta aquí. A mi abuela Nancy, por estar presente en todos mis proyectos y ser apoyo en cada momento de mi vida, como fue también en este.

A mi hermano y a Yadi, por estar dispuestos a ayudar en lo que les fue posible y poner su granito de arena para que yo llegara a la meta.

A mis padres por ser mi luz y mi guía, por dejarme saber que siempre están presentes a pesar de la distancia, por sus palabras y su amor incondicional, porque cada logro y todo lo que soy es por ellos y para ellos.

RESUMEN

El aprovechamiento de determinados residuos en la construcción conduce a importantes beneficios económicos, sociales y medioambientales. El vidrio es un material con altas cifras de reciclaje, además de poseer características idóneas para ser tratado y reutilizados como sustituto de algunas materias primas de los materiales de construcción. Este trabajo hace un análisis de las variaciones que produce la sustitución del 25% del árido por vidrio triturado en morteros de cemento y morteros bastardos de cal y arena. Para ello, se realizó la caracterización mineralógica y se determinaron las propiedades físicas, mecánicas, así como las velocidades de transmisión de ultrasonidos. Además, las muestras se sometieron a calentamiento a 800°C para evaluar el comportamiento de los morteros con material vítreo incorporado ante altas temperaturas. En la comparación entre los resultados, se aplicaron pruebas estadísticas que validaron si las variaciones obtenidas se podían considerar significativas. Los resultados demostraron que no existen diferencias considerables en la estructura mineralógica ni en las velocidades de ultrasonido entre las muestras de referencia y las que contenían el porcentaje de vidrio. De manera general, se obtuvo un mejor comportamiento a temperatura ambiente en los morteros bastardos con respecto a los de cemento en cuanto a propiedades físicas y mecánicas, al incorporar el vidrio triturado, presentándose una disminución en los morteros de cemento, mientras que los bastardos las diferencias no fueron considerables. Tras el calentamiento los morteros de cemento presentaron menores resistencias mecánicas cuando contenían material vítreo y en los morteros bastardos las diferencias sólo se apreciaron en la resistencia a compresión.

Palabras claves:

Mortero de cemento, mortero bastardo, vidrio triturado, propiedades físicas, propiedades mecánicas, composición mineralógica

ABSTRACT

The use of certain wastes in construction leads to significant economic, social and environmental benefits. Glass is a material with high recycling rates, besides having suitable characteristics to be treated and reused as a substitute for some raw materials in construction materials. This work makes an analysis of the variations produced by the substitution of 25% of the aggregate by crushed glass in cement mortars and lime and sand mortars. For this, mineralogical characterization was carried out and the physical and mechanical properties, as well as ultrasonic transmission velocities were determined. In addition, the samples were heated to 800°C to evaluate the behavior of the mortars with incorporated vitreous material at high temperatures. In the comparison between the results, statistical tests were applied to validate whether the variations obtained could be considered significant. The results showed that there are no considerable differences in the mineralogical structure or in the ultrasonic velocities between the reference samples and those containing the percentage of glass. In general, a better behavior was obtained at room temperature in the mortars with respect to the cement mortars in terms of physical and mechanical properties when incorporating the crushed glass, with a decrease in the cement mortars, while the differences were not considerable in the cement mortars. After heating, the cement mortars showed lower mechanical resistance when they contained glass material, and the differences were only seen in the compressive strength of the vitreous mortars.

Keywords:

Cement mortar, bastard mortar, crushed glass, physical properties, mechanical properties, mineralogical composition

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. La gestión de residuos en el mundo, la Unión Europea y España. Reciclaje del vidrio	3
1.2. Historia del uso de los morteros.....	12
1.3. Morteros, diferentes clasificaciones. Morteros de cemento y morteros bastardos de cemento y cal, principales usos en la construcción	14
1.4. Propiedades de los morteros	16
1.4.1. Propiedades en estado fresco	16
1.4.2. Propiedades en estado endurecido	18
2. JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN....	21
3. ESTADO DE LA CUESTIÓN. UN ACERCAMIENTO A LA UTILIZACIÓN DE VIDRIO RECICLADO EN HORMIGONES Y MORTEROS	23
3.1. Utilización del vidrio reciclado como sustituto del cemento o árido en hormigones	23
3.2. Utilización del vidrio como sustituto del cemento o árido en morteros	26
4. OBJETIVOS	31
4.1. Objetivo general.....	31
4.2. Objetivos específicos	31
5. METODOLOGÍA Y FASES DE LA INVESTIGACIÓN	32
5.1. Proceso experimental	34
5.1.1. Tipos de morteros y cantidad de probetas preparadas para ensayar	34
5.1.2. Materiales	35
5.1.3. Dosificaciones.....	37
5.1.4. Procedimiento para la elaboración de las muestras	37
5.1.5. Procedimiento para la realización de los ensayos	41
5.1.5.1. Ensayos no destructivos.....	41
5.1.5.2. Ensayos destructivos.....	46
5.1.5.3. Ensayos para la caracterización mineralógica	49
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
6.1. Caracterización mineralógica.....	51

6.2.	Resultados de ensayos no destructivos.....	53
6.2.1.	Propiedades físicas	53
6.2.2.	Velocidad de ultrasonido	56
6.3.	Resultados de ensayos destructivos.....	61
6.3.1.	Propiedades mecánicas	61
7.	CONCLUSIONES	67
8.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	69
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
	ANEXOS	77
	Anexo A: Tipos de morteros y cantidad de probetas preparadas para ensayar	77
	Anexo B: Resultados de los ensayos físicos.....	78
	Anexo C: Resultados de los ensayos mecánicos.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Tipos de desechos sólidos.....	4
Tabla 1.2: Reciclado por categoría de residuos en España (miles de toneladas) y tasa anual de crecimiento.....	9
Tabla 5.1: Dosificaciones empleadas por amasadas en la fabricación de los cuatro tipos de morteros.....	37
Tabla 6.1: Estadísticos descriptivos de la Densidad Aparente (D_a) y Porosidad Abierta (P_a) por tipo de mortero	53
Tabla 6.2: Resultados del contraste de hipótesis para las propiedades físicas	56
Tabla 6.3a: Estadísticos de velocidades de ultrasonido a temperatura ambiente, por tipo de mortero y por eje.....	56
Tabla 6.3b: Estadísticos de velocidades de ultrasonido después del calentamiento, por tipo de mortero y por eje	57
Tabla 6.4: Resultados del primer contraste de hipótesis para las velocidades de ultrasonido.....	60
Tabla 6.5: Resultados del segundo contraste de hipótesis para las velocidades de ultrasonido.....	60
Tabla 6.6: Resultados del tercer contraste de hipótesis para las velocidades de ultrasonido.....	61
Tabla 6.7: Estadísticos de propiedades mecánicas por tipo de mortero.....	62
Tabla 6.8: Resultados del primer contraste de hipótesis para las propiedades mecánicas.	65
Tabla 6.9: Resultados del segundo contraste de hipótesis para las propiedades mecánicas	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1: Residuos sólidos per cápita a nivel global	5
Fig. 1.2: Residuos municipales generados en el año 2020 en la Unión Europea por países.....	6
Fig. 1.3: Cuenta de los residuos 2015-2019	8
Fig. 1.4: Tratamiento final de residuos (porcentaje), 2019.....	9
Fig. 1.5: El proceso de una planta de tratamiento de envases de vidrio.....	11
Fig. 5.1: Esquema descriptivo de la metodología seguida en la investigación	33
Fig. 5.2: Granulometría de la arena normalizada y del vidrio triturado	36
Fig. 5.3: Amasado de la mezcla antes de pasar a velocidad rápida	38
Fig. 5.4: Elaboración de las probetas, a) Llenado de primera capa, b) Primera capa después de la compactación	39
Fig. 5.5: Probetas en los moldes después de nivelar y suavizar la superficie .	40
Fig. 5.6: Moldes etiquetados y cerrados en plástico antes de llevarlos a la cámara de humedad	40
Fig. 5.7: Probetas en mufla, a) Antes de ser sometidas al calentamiento a 800°C, b) Después de ser sometidas al calentamiento a 800°C	41
Fig. 5.8: Ensayos de ultrasonidos, a) Equipo y medios utilizados para la realización de los ensayos, b) Equipo calibrado.....	42
Fig. 5.9: Esquema de determinación de velocidades de ultrasonidos en muestras de 40x40x140 mm	43
Fig. 5.10: Pesado de muestra de mortero	44
Fig. 5.11: Inmersión en agua de las probetas en recipiente al vacío	44
Fig. 5.12: Determinación de los pesos saturados sumergidos mediante balanza hidrostática	44
Fig. 5.13: Muestras recuperadas después de ser saturadas	45
Fig. 5.14: Probetas deshechas al ser hidratadas después del calentamiento .	46
Fig. 5.15: Ensayo de resistencia a flexión	47

Fig. 5.16: Ensayo de resistencia a compresión	48
Fig. 5.17: Molienda fina en micro molino vibratorio.....	49
Fig. 5.18: Trituración de manera manual.	49
Fig. 5.19: Tamiz utilizado para preparar las muestras.	50
Fig. 5.20: Muestras preparadas para el análisis mineralógico.	50
Fig. 6.1: Difractograma obtenido para muestras de mortero de cemento.	51
Fig. 6.2: Difractograma obtenido para muestras de mortero bastardo.....	52
Fig. 6.3: Densidad aparente (D_a) tras el curado y después del calentamiento.	54
Fig. 6.4: Porosidad abierta (P_a) tras el curado y después del calentamiento. .	54
Fig. 6.5: Velocidad de transmisión de ultrasonido en el eje X	57
Fig. 6.6: Velocidad de transmisión de ultrasonido en el eje Y	57
Fig. 6.7: Velocidad de transmisión de ultrasonido en el eje Z.....	58
Fig. 6.8: Resistencia a flexión (R_f) por tipos de morteros tras el curado y después del calentamiento.....	63
Fig. 6.9: Resistencia a compresión (R_c) por tipos de morteros tras el curado y después del calentamiento.....	63

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad moderna actual entraña necesidades que obligan a revisar y cambiar el modelo de crecimiento económico lineal, implementado de manera absoluta hasta hace algunos años. La utilización de los recursos de una forma racional y sostenible supone un reto que se precisa alcanzar para resolver o minimizar problemas que aquejan al hombre, las sociedades, las economías, el medio ambiente y el planeta en general.

Muchos de los recursos naturales que se utilizan en los diferentes sectores de la economía son fuentes agotables, por lo que encontrar la vía para hacer su vida útil lo más larga posible se ha convertido en una necesidad imperante. Para ello se hace imprescindible rediseñar los patrones de consumo, producción y servicios, las formas de generar energía y de tratar los residuos. En este sentido, varias políticas encaminadas a la aplicación de un modelo de economía circular se desarrollan a nivel global.

En el caso de la Unión Europea, en el año 2015, con el objetivo de encaminar la economía hacia un cambio de modelo, la Comisión Europea aprobó un plan de acción que contenía 54 medidas, centradas en 5 sectores fundamentales, siendo la construcción y demolición uno de ellos. Posteriormente, en el 2019 se presentó una hoja de ruta, con el propósito de convertir la economía de la Unión Europea en una economía sostenible, nombrada “Pacto Verde Europeo”, la cual incluyó en el 2020 un nuevo “Plan de Acción para la economía circular”, abarcando todos los sectores e intentando integrar a todos en la transición de una manera inteligente y justa.

Estas políticas dentro de sus estrategias, proponen actuaciones para el tratamiento y gestión de los residuos con una mirada ambiciosa hacia un futuro con tendencia a la disminución de los vertidos y aumento del reciclado, planteando medidas precisas que tienen en cuenta las particularidades de cada región y las dificultades que se puedan presentar durante su implementación.

En España se generan más de 100 millones de toneladas de residuos todos los años, comportándose de manera creciente en la última década según estadísticas de las instituciones encargadas de registrar estos datos. La cantidad de residuos que se gestionan representan un porcentaje cada vez más elevado del total generado; sin embargo, todavía una gran parte acaban en vertederos,

lo que evidencia que hay mucho por hacer en la aplicación del concepto de economía circular.

No obstante, existe un notable incremento en las cifras de reciclaje en los últimos años, encontrándose el vidrio dentro de los materiales sólidos con mayores tasas de crecimiento.

Ecovidrio (entidad sin ánimo de lucro dedicada a la gestión de los envases de vidrio en España), arroja estadísticas anuales acerca del reciclado de envases de vidrio que resultan muy interesantes. Como ejemplo, se puede mencionar que en el año 2021 se instalaron 5 044 contenedores más con respecto al año anterior, para llegar a un total de 240 303 contenedores y las toneladas de envases de vidrio recogidas en los iglús aumentó en un 4.75% (Ecovidrio, s.f.).

Por otra parte, dentro del sector de la construcción, en los últimos años ha habido una tendencia cada vez mayor hacia la investigación acerca de la utilización de residuos tanto de construcción y demolición como residuos sólidos urbanos en la producción de materiales de construcción con bajo impacto ambiental. Varias de estas investigaciones se han centrado en la posibilidad de emplear estos residuos en la producción de hormigones y morteros, debido al extenso uso de estos materiales en el sector.

Los morteros son unos de los materiales de construcción más antiguos y sus usos son múltiples tanto en construcciones nuevas como en la rehabilitación arquitectónica y la restauración del patrimonio. Independientemente del tipo de mortero, todos tienen en común el empleo de árido, por lo que encontrar una alternativa a su utilización, que reduzca el consumo de este recurso natural, se ha convertido en un tema de motivación para la investigación.

Para que la sustitución del árido por materiales reciclados sea un proyecto factible desde el punto de vista tanto económico como ecológico, no solo se pueden cumplir con los requerimientos de propiedades; además, se deberán considerar las acciones de recuperación, segregación y traslado de los residuos.

En relación a esto, en cualquier país donde se implemente una política básica de reciclaje, la utilización de vidrio reciclado en la sustitución de árido para la producción de morteros y hormigones, resulta una alternativa atractiva, ya que no supone un proceso diferente ni una inversión mayor a la que ya es adoptada. El reciclaje del vidrio se caracteriza por su limpieza, por su facilidad de

separación, trituración y control de la granulometría, no requiriéndose equipos que utilicen mayor energía en el machaqueo que los empleados habitualmente en las plantas de tratamiento de residuos y en las canteras (Flores et al., 2018). Además, el vidrio posee propiedades que apuntan a ser un material viable para la sustitución del árido silíceo en las mezclas, como son su alta resistencia química y a la compresión, su carácter pulverizable y su alta compacidad.

Diversas investigaciones a nivel internacional y en España, han demostrado que la sustitución del árido por vidrio reciclado en porcentajes determinados en morteros de cemento, mejora la durabilidad del material, no provoca variaciones significativas en las propiedades mecánicas, además de presentar mejor comportamiento de las mismas al someter el material a altas temperaturas.

1.1. La gestión de residuos en el mundo, la Unión Europea y España. Reciclaje del vidrio

El ritmo acelerado que vive la urbanización en estos tiempos, unido al desarrollo de la actividad productiva, el consumismo y la falta de gestión de los residuos han causado la aparición de extensos vertederos, siendo un problema que afecta a un gran número de países, dañando grandes superficies de sus territorios y produciendo perjuicios enormes al medio ambiente y la salud.

A nivel global se producen más de 2 100 millones de toneladas de residuos, llegándose a reciclar solamente el 16%, según Verisk Maplecroft, organización de origen británico, en su “Waste Generation and Recycling Indices 2019”. El Banco Mundial, en este mismo sentido, estima en su informe, “What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050”, que habrá un incremento de 2 010 millones de toneladas de residuos registradas en 2016, a 3 400 millones para el 2050 (Carvajal et al., 2021).

Existen múltiples clasificaciones de los residuos en dependencia de la bibliografía que se consulte, el sector de las instituciones que estén involucradas en su gestión y de las diferentes regiones y países. Por ejemplo, según Tchobanoglous, et al. (1994), los desechos sólidos se pueden clasificar de la manera que se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Tipos de desechos sólidos

Tipos	Clases	Ejemplos
Doméstico y Comercial	Orgánicos (combustibles)	Restos de comida, papel de todo tipo, cartón, plásticos de todos los tipos, textiles, goma, cuero, madera y desechos de jardín
	Inorgánicos (incombustibles)	Vidrio, cerámica, latas, aluminio, metales ferrosos, suciedad. Artículos voluminosos (línea marrón): muebles, lámparas, bibliotecas, archivadores. Línea blanca: cocinas, hornos, neveras, lavadoras y secadoras. Pilas y baterías provenientes de los artículos domésticos y vehículos
	Especiales	Aceites y cauchos generados por los automóviles
Institucionales	Igual que los domésticos y comerciales	Se generan en instituciones gubernamentales, escuelas, hospitales y cárceles
Construcción y demolición	Construcción	Ladrillos, hormigón, piedras, suciedad, maderas, grava, piezas de fontanería, calefacción y electricidad.
	Demolición	Similar a los desechos de construcción, pero pueden incluir vidrios rotos, plásticos y acero de reforzamiento.
Servicios municipales	Plantas de tratamiento	Fangos provenientes del tratamiento de aguas residuales.
	Plantas de incineración	Cenizas, vidrio, cerámica, metales, madera
Industriales		Desechos de plantas de procesos industriales, chatarra, desechos especiales y peligrosos.
Agrícolas y pecuarios		Desechos de cultivos y estiércol generado por la ganadería de leche y engorde.

Fuente: Adaptado de "Evolución de la política medioambiental en la gestión de residuos" (p. 267), por H. Carvajal, 2021, Revista Universidad y Sociedad, 13(2), según Tchobanoglous, et al. (1994)

A nivel internacional, diversas instituciones registran las cantidades de residuos que se generan y gestionan por regiones y países, así como la composición de estos residuos, lo cual permite enfocar de una mejor manera las líneas estratégicas que se deberán seguir para minimizar lo más posible el impacto negativo del vertimiento de los mismos y su no aprovechamiento.

Según Kaza et al. (2018), de acuerdo a datos actualizados en el 2016, la región de Asia Oriental y el Pacífico fue la que mayor porcentaje de residuos generó a nivel global con un 23%, lo que en términos absolutos se traduce a unos 468 millones de toneladas de residuos, seguido de Europa y Asia Central con un porcentaje no muy inferior, representando el 20% de los residuos mundiales con 392 millones de toneladas generadas; mientras que la región de

Oriente Medio y Norte de África es la que menores cifras presenta, con 129 millones de toneladas lo que constituye el 6% de los residuos globales.

Sin embargo, si se analiza la cantidad de residuos generados per cápita, los países de renta alta presentan las mayores cifras (Figura 1.1). América del Norte se sitúa en el primer puesto, produciendo una cantidad media de residuos per cápita de 2.21 kilogramos al día, seguido de Europa y Asia Central con unos 1.18 kilogramos al día; mientras que las tres regiones con la mayor cantidad de países de renta baja y media (África Subsahariana, Asia Meridional y Asia Oriental y el Pacífico) generan la menor cantidad de residuos per cápita (Kaza et al., 2018).

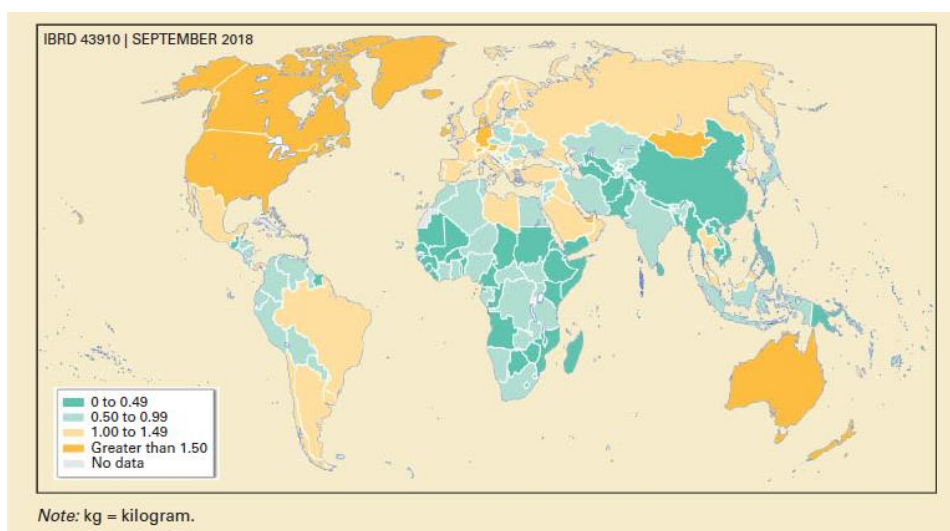


Fig. 1.1: Residuos sólidos per cápita a nivel global

Fuente: Adaptado de "What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050" (p.19), por S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata y F. Van, 2018, World Bank Group.

En cuanto a la composición de los residuos generados a nivel global, el mayor porcentaje está constituido por los alimentos y residuos verdes, que representan el 44% de los residuos mundiales, seguido de los residuos secos reciclables (plástico, papel y cartón, metal y vidrio) que suponen un 38%, el caucho y la madera representan el 4%, y el resto está compuesto por otros residuos (Kaza et al., 2018).

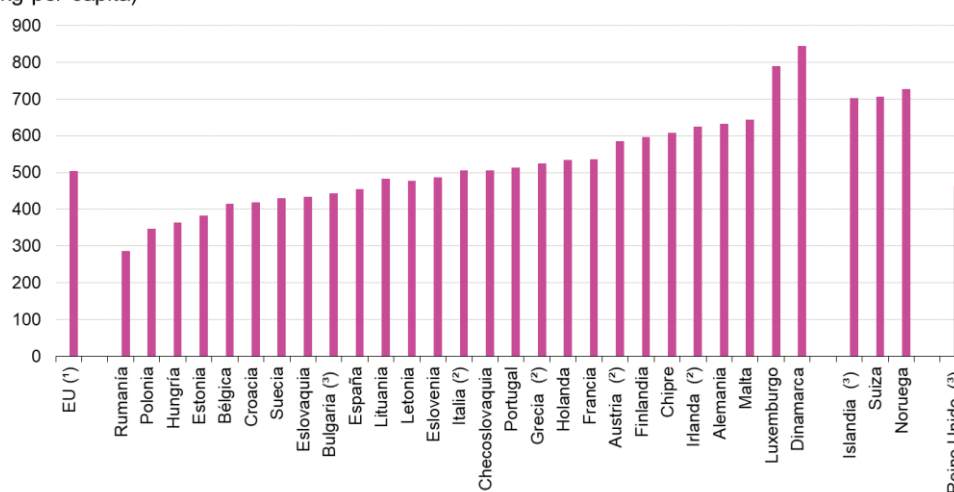
Respecto su tratamiento, casi el 40% de los residuos a nivel mundial se eliminan en vertederos, aproximadamente el 19% se recupera mediante el reciclaje y compostaje, y el 11% se trata mediante la incineración moderna.

Aunque en todo el mundo el 33% de los residuos se sigue arrojando abiertamente (Kaza et al., 2018).

Según EUROSTAT (2021), en el año 2020 la Unión Europea registró una generación de 505 kg de residuos municipales per cápita, con diferencias considerables entre los países miembros, siendo Dinamarca, Luxemburgo, Malta, Alemania e Irlanda los que reportaron mayores cifras; mientras que, Rumanía, Polonia, Hungría, Estonia y Bélgica se ubicaron dentro de los países con menor generación de residuos per cápita (Figura 1.2).

Residuos municipales generados, año 2020

(kg per cápita)



Nota: Los países están clasificados en orden creciente por generación de residuos municipales en 2020.

(*) Estimado.

(‡) Irlanda, Italia, Grecia, Austria, datos 2019.

(‡) Bulgaria, Islandia, Reino Unido, datos 2018.

Fig. 1.2: Residuos municipales generados en el año 2020 en la Unión Europea por países

Fuente: Adaptado de Municipal Waste Statistics (Municipal waste generated, 2005 and 2020), por EUROSTAT, Statistics Explained, 2021. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained>

En cuanto a la gestión de residuos, en la Unión Europea, a pesar de un aumento en la generación municipal entre el año 1995 y 2020, la cantidad total de estos materiales depositados ha disminuido en un 58%, lo que representan 69 millones de toneladas, reduciéndose anualmente los vertidos en el período de 2005-2020 en 3.4% como promedio. Esto condujo a que la tasa pasara de un 61% en 1995 a un 23% en 2020 (EUROSTAT, 2021).

Las políticas medioambientales europeas han influido positivamente en que se presente esta reducción. Desde 1970, la legislación medioambiental europea ha venido evolucionando, llegando a existir actualmente varios reglamentos, directivas y decisiones respecto al tema.

En los años 90, la reducción, reutilización y reciclaje fueron temas abordados en la legislación, junto al análisis de medidas encaminadas a la protección ambiental (Carvajal et al., 2021). Por ejemplo, la Directiva 94/62/CE consideraba “necesario armonizar las diversas medidas nacionales sobre gestión de envases y residuos de envases, con el fin de evitar y reducir su impacto ambiental...” (Diario Oficial de las Comunidades Europeas [DOCE], 1994, p.10). Años más tarde, la Directiva 1999/31/CE sobre vertederos planteaba que los países de la Unión Europea debían aplicar medidas y estrategias que disminuyan de manera progresiva la cantidad de residuos biodegradables que terminan en vertederos, poniéndose como meta la reducción al 10% en 2035 (Diario Oficial de las Comunidades Europeas [DOCE], 1999).

La Unión Europea, en el año 2018, implementó un grupo de medidas que modificaban y ampliaban el contenido de directivas anteriores encaminadas al cuidado del medioambiente y la salud ciudadana, promover la economía circular, el uso racional de recursos y la eficiencia energética. Estas medidas se recogen en la Directiva (UE) 2018/849, la Directiva (UE) 2018/850, la Directiva (UE) 2018/851, la Directiva (UE) 2018/852. Estas directivas tienen como meta lograr mayores tasas de reciclaje y reutilización de los residuos, llegando a alcanzar al menos el 55% para el 2025, 60% para el 2030 y el 65% para el 2035 (Carvajal et al., 2021).

En diciembre del 2019 se pone en marcha el Pacto Verde Europeo, como un conjunto de iniciativas políticas que sirvieran como guía a la Unión Europea en la transición ecológica, con el objetivo final de alcanzar la neutralidad climática en el 2050. En este marco, como componente del Pacto, la Unión Europea adoptó el Nuevo plan de acción de economía circular en marzo de 2020, el cual está encaminado al diseño de productos que tengan en cuenta todo su ciclo de vida, de manera que se aplique el concepto de circularidad, se reduzcan los residuos y que los recursos que se utilicen se mantengan el mayor tiempo posible dentro de la economía de la Unión Europea (Unión Europea, s.f.).

Estas políticas han conducido a que la cifra de residuos tratados muestre un crecimiento sostenido. Del año 1995 al 2020 la cantidad de residuos reciclados pasó de 23 millones de toneladas (69 kg per cápita) a 67 millones de toneladas (151 kg per cápita). Aunque no como el reciclaje, la incineración de residuos también creció de manera constante en este período, aumentando en 31 millones de toneladas desde 1995 al 2020, lo que representa un 105% (EUROSTAT, 2021).

En el caso de España, según los últimos datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística (2021), que actualiza las “Cuentas medioambientales: Cuenta de los residuos, Año 2019”, la economía española generó 133.2 millones de toneladas de residuos ese año, cifra que, a pesar de ser menor con respecto al 2018, evidencia una tendencia al crecimiento en los últimos años (Figura 1.3).

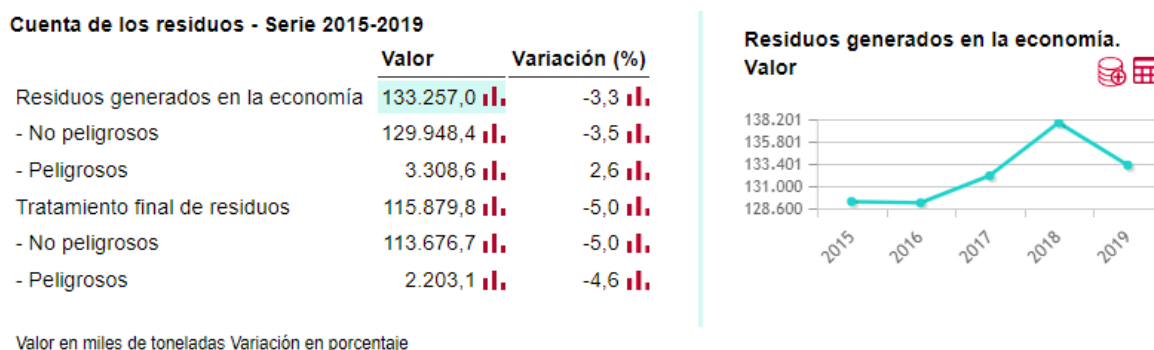


Fig. 1.3: Cuenta de los residuos 2015-2019

Fuente: Reproducido de “Cuenta de los residuos –Serie 2015-2019”, por Cuentas Ambientales: Cuenta de los residuos. Últimos datos, 2021, Instituto Nacional de Estadística. https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177062&menu=ultiDatos&idp=1254735976603

De los 133.2 millones de toneladas de residuos generados en 2019, las empresas de tratamiento final de residuos gestionaron 115.9 millones de toneladas, lo que representa un 87%. De este total de residuos tratados, el 42.4% se reciclaron, el 12.5% se reutilizaron en operaciones de relleno, el 3.4% se incineraron y el 41.7% acabaron en el vertedero (Figura 1.4) (Instituto Nacional de Estadística, 2021).

Incorporación de vidrios reciclados en la fabricación de nuevos materiales de bajo impacto ambiental.

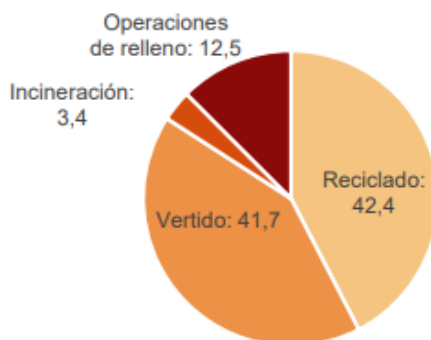


Fig. 1.4: Tratamiento final de residuos (porcentaje), 2019

Fuente: Reproducido de “Tratamiento final de residuos (porcentaje). Año 2019”, por Cuentas medioambientales: Cuentas de los Residuos. Año 2019 (p.5), 2021, Instituto Nacional de Estadística. https://www.ine.es/prensa/cma_2019_res.pdf

Estas cifras ponen de manifiesto que España todavía tiene que recorrer un largo camino para lograr la circularidad; no obstante, la cantidad de residuos reciclados ha aumentado un 19% entre el año 2015 y 2019, siendo el vidrio el residuo reciclado que presenta mayor tasa anual de crecimiento en el 2019 con un 16.1% (Tabla 1.2) (Instituto Nacional de Estadística, 2021).

Tabla 1.2: Reciclado por categoría de residuos en España (miles de toneladas) y tasa anual de crecimiento

Residuo reciclados (por tipos)	Reciclado	%	Tasa anual
Minerales	23 270.1	47.8	11.1
Metálicos	10 270.1	20.9	-4.4
Papel y Cartón	3 904.8	8.0	-0.2
Residuos mezclados	3 621.2	7.4	-0.2
Animales y vegetales	1 780.2	3.6	0.5
Vidrio	1 295.2	2.6	16.1
Químicos	1 236.8	2.5	-2.9
Lodos comunes	1 104.6	2.3	-13.2
Madera	984.4	2.0	1.8
Plásticos	722.9	1.5	12.0
Equipos desechados	480.4	1.0	-15.8
Otros	212.1	0.4	15.5
Total	49 109.7	100	3.9

Fuente: Adaptado de “Reciclado por categoría de residuos. Año 2019”, por Cuentas medioambientales: Cuentas de los Residuos. Año 2019 (p.6), 2021, Instituto Nacional de Estadística. https://www.ine.es/prensa/cma_2019_res.pdf

Desde inicios del milenio 2000, la cantidad de vidrio recogido en España ha presentado un crecimiento constante. En el año 2008 con respecto al 2000, las cifras mostraron que el reciclaje estatal de este material había llegado a duplicarse, alcanzando una tasa de 60.3%. El 60% que la Unión Europea

establecía como cantidad obligada de reciclaje de vidrio, para el 2015 se llegó a superar en un 8% y alcanzó a ser el 70% del total de vidrio que fue generado por los ciudadanos en el 2017 (Flores et al., 2018).

De la trasposición de la Directiva europea 94/62/CE nace en 1997 en España, la Ley de Envases y Residuos de Envases 11/1997, la cual responsabiliza a los productores con el impacto ambiental y la gestión del reciclaje de los residuos que puedan generar los productos envasados que saquen al mercado (Boletín Oficial del Estado [BOE], 1997).

Como apoyo a esta Ley, se constituyó ese mismo año Ecovidrio como una entidad sin ánimo de lucro, con el objetivo de gestionar la recogida selectiva y el reciclado de los envases de vidrio en el país.

Según datos registrados en 2021 por esta entidad, en España se han instalado más de 240 000 contenedores verdes y más de 200 compañías realizan la recogida selectiva del vidrio (Ecovidrio, s.f.), mejorando cifras de años anteriores donde ya se situaba entre uno de los países de Europa con mayor dotación de este equipamiento (Flores et al., 2018). Una creciente concienciación con el tema, aunque todavía insuficiente, arrojan estadísticas interesantes con respecto al reciclado de envases de vidrio. Como ejemplo de esto, se puede mencionar que 7 de cada 10 envases de vidrio son reciclados y que 19 kg de vidrio o 64 envases se reciclan al año por habitante en España (Ecovidrio, s.f.).

La tendencia al crecimiento que ha experimentado en los últimos años el reciclado del vidrio en España se evidencia en las cifras publicadas por Ecovidrio. En el año 2020 hubo una reducción en el reciclaje de unas 52 141 toneladas con respecto al 2019, sin embargo, en el 2021 las cifras ascendieron llegando a alcanzar las 950 552 toneladas. De este total, 884 000 toneladas de envases fueron procedentes de los contenedores, cifra similar a la de 2019 y los envases recogidos en plantas de Residuos Urbanos también aumentaron en un 4.3% (epdata, 2022).

Las comunidades autónomas que más envases de vidrio depositaron en los contenedores verdes fueron Baleares, con 36.5 kilos por habitante; País Vasco, con 28.2 kilos por habitante; La Rioja, con 26.8 kilos por habitante;

Navarra, 26.1 kilos por habitante y Cataluña, con 22.8 kilos por habitante (epdata, 2022).

Proceso de reciclaje del vidrio:

El proceso de reciclaje del vidrio comienza con el depósito de los envases de este material, por parte de los ciudadanos, en los contenedores verdes conocidos como iglús. Posteriormente se realiza la recogida y el traslado de estos envases en camión hasta la planta de tratamiento (Figura 1.5) (Hablando en Vidrio, 2022).

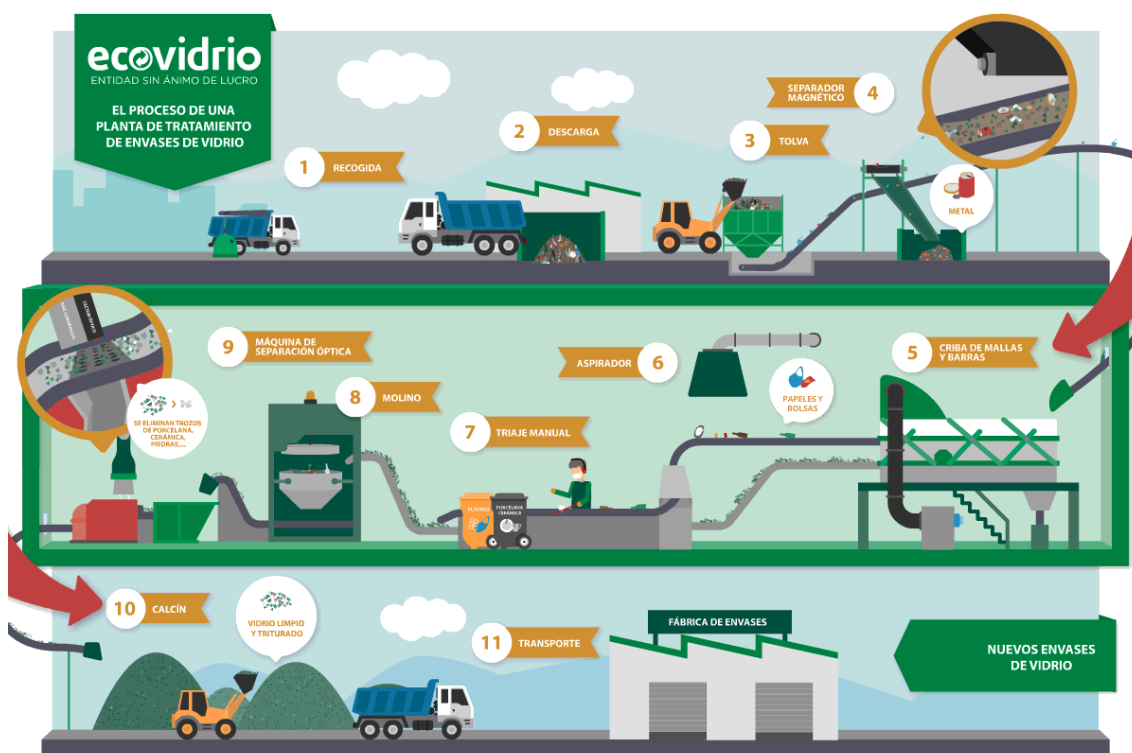


Fig. 1.5: El proceso de una planta de tratamiento de envases de vidrio

Fuente: Reproducido de ¿Sabes qué es el calcín?, por Ecovidrio, 2022, Hablando en Vidrio.

<https://hablandoenvidrio.com/que-es-el-calcin/>

Cuando el vidrio llega a la planta, los envases y cascotes son introducidos en una tolva elevada mediante una pala cargadora, para ser vertidos y transportados a través de cintas que separan las impurezas del material útil, teniendo incluido un separador magnético, encargado de recoger permanentemente una gran cantidad de los elementos metálicos como tapones de las botellas, tarros y frascos.

El siguiente paso es la clasificación del vidrio por su granulometría a través de diferentes cribas. Posteriormente se separan los residuos como papel o bolsas de plástico que hayan quedado, mediante un aspirador. Todos los elementos de gran tamaño que quedan después de las etapas anteriores son retirados de las cintas mediante el triaje manual.

A continuación, el vidrio es triturado obteniéndose el calcín. Para culminar, este pasa por las máquinas de separación óptica, las cuales separan las impurezas no detectadas anteriormente, mediante el lanzamiento de un chorro de aire comprimido al rastrear ópticamente cuerpos opacos dentro de los trozos de vidrio. El material resultante, vidrio limpio y triturado, es utilizado principalmente en la fabricación de nuevos envases (Hablando en Vidrio, 2022).

La utilización del calcín como remplazo de materias primas de materiales de construcción, es una alternativa viable que podría reducir la explotación de canteras y la contaminación ambiental. Uno de los materiales, en los que se podrían aprovechar las propiedades del vidrio reciclado, son los morteros, siendo propósito de este trabajo abundar en el tema.

1.2. Historia del uso de los morteros

El origen del empleo del mortero se remonta a la prehistoria (Malinowski y Garfinkel, 1991). Según Alvarez et al. (1995), aunque existen discrepancias respecto al tema, varios autores hablan en sus estudios del hallazgo de restos de utilización de morteros de cal en suelos pavimentados que se remontan a la prehistoria en el Mediterráneo Oriental y en Europa; además, a pesar de no conocerse la técnica de calcinación utilizada, se han encontrado restos de los hornos empleados. (Garfinkel, 1987).

Los egipcios usaron barro mezclado con paja para unir ladrillos secos (Vazquez, 2012) y fueron los primeros en utilizar el yeso para el mampostado de los bloques de la pirámide de Keops (hacia 2600 a. de C.) (Furlan y Bissegger, 1975).

Los primeros morteros de cal utilizados en la región fueron empleados en los trabajos de reconstrucción y de restauración en el Templo de Amon, en la época ptolemaica, influencia de las invasiones extranjeras. (Martinet, 1991).

La utilización por los griegos del mortero de cal para la construcción de muros se remonta a finales del siglo II o principios del siglo I a. de C. (Furlan y

Bisseger, 1975). De forma general, los morteros griegos estaban elaborados a base de cal y arena fina y los estucos de cal, yeso y polvo de mármol. En varias partes de Grecia fue empleado el procedimiento de añadir a la mezcla cal-arena, sustancias que confieren al mortero estabilidad ante el agua y una mayor dureza, como es el caso de las construcciones en Théa y en los estucos que ornamentaban el Héphaïstéion de Atenas, donde se introducía el polvo volcánico a la mezcla (Furlan y Bisseger, 1975).

Ante la falta de roca volcánica, se utilizaba tejo o ladrillo triturado. La adición a las mezclas de materiales que pudieran mejorar las características de las mismas y más específicamente el comienzo del empleo de las puzolanas fue un paso crucial, el cual puede considerarse que es el origen de los morteros hidráulicos modernos (Alvarez et al., 1995).

Los romanos heredaron las técnicas de construcción griegas y el empleo del mortero de cal; además, continuaron con la técnica de añadir a la mezcla sustancias que favorecían las propiedades de los morteros. La utilización de morteros de cal en Roma se sabe que tuvo lugar en los dos últimos siglos de la República (II y I a. de C).

Por Vitruvio se sabe que, en los morteros romanos, además de los materiales principales (cal y arena), se empleaban aditivos como los usados por los griegos, siendo habitual la adición de la arcilla cocida y sobre todo de puzolana (roca volcánica que debe su nombre a los yacimientos descubiertos en Pozzuoli cerca de Nápoles), confiriéndole al mortero propiedades hidráulicas (Alvarez et al., 1995).

En la época medieval, la situación económica, contribuyó a que no se registre un progreso técnico considerable en este sentido.

La evolución de los morteros en los próximos años hasta la caída del Imperio Romano se mantuvo de manera continua, pero lenta. El fin del imperio trajo consigo una paralización del uso de las técnicas utilizadas hasta el momento, que no se volvieron a emplear hasta mediados del siglo XVIII (Vazquez, 2012).

El uso de los ligantes hidráulicos modernos tienen su origen en el año 1756, cuando Smeaton añadió ladrillo molido y canto rodado a una mezcla que buscaba resistir la acción del agua de mar para la construcción del faro Eddyston

(Plymouth), lo que se ha considerado el primer hormigón de la historia (Furlan y Bisseger, 1975; Rassiniaux et al., 1989).

Las mezclas entre calizas puras y arcillas, fueron estudiadas por Vicat en 1812, el cual demostró de manera definitiva que las propiedades hidráulicas dependen de los compuestos formados entre la cal y los constituyentes de la arcilla durante la cocción (Furlan y Bisseger, 1975). La obtención de productos más o menos hidráulicos dependía entonces de la temperatura, tiempo de cocción y el contenido de arcilla. Las investigaciones de Vicat fueron una base científica para la fabricación y empleo de cales hidráulicas (Ashurst; 1983).

Por otra parte, la aparición del primer tipo de cemento Portland, en 1824, patentado por Joseph Apsdin y posteriormente mejorado en 1838 por su hijo William, fueron el inicio del cemento Portland actual (Ashurst, 1983). Años más tarde, Charles Johnson obtuvo por primera vez el Clinker, la base del cemento artificial moderno (Alvarez et al., 1995).

A partir del año 1850, en la producción de cementos ya se empleaban métodos modernos. El desarrollo de los materiales como cales hidráulicas, cementos naturales y especialmente el cemento Portland, han propiciado la obtención de otros materiales compuestos con propiedades mejoradas como son los morteros modernos.

1.3. Morteros, diferentes clasificaciones. Morteros de cemento y morteros bastardos de cemento y cal, principales usos en la construcción

El mortero es una mezcla homogénea a base de arena, agua y un material aglomerante que puede ser cemento Portland, yeso o cal, al cual se le pueden agregar aditivos y/o adiciones.

Los morteros se pueden clasificar según su forma de fabricación como: morteros fabricados "in situ", los cuales se obtienen de mezclar en la hormigonera sus componentes; morteros industriales, que se pueden diferenciar en secos y húmedos, estos últimos siempre incorporan en su composición aditivos retardadores de fraguado y morteros industriales semi-terminados, como pueden ser predosificados (aquellos en los que los elementos sólidos están ya mezclados y solo hay que añadir el agua) y los premezclados de cal y arena, los cuales son un tipo particular de mortero industrial seco.

Los morteros industriales son los morteros más utilizados en la actualidad y son morteros elaborados en fábrica y suministrados a obra. Estos morteros pueden ser de varios tipos:

-Morteros secos: son mezclas ponderales de sus componentes primarios sólidos en proporciones adecuadas dosificadas y mezcladas en fábrica.

-Morteros Húmedos: son mezclas ponderales de sus componentes en proporción adecuada y amasado en la fábrica con el agua necesaria. Estos morteros contienen retardadores de fraguado por lo que su trabajabilidad se puede prolongar hasta varios días sin perder sus características. Cada vez son menos utilizados, ya que resulta complicado su almacenamiento y conservación (Canal Materiales de Construcción, 2019).

Según el tipo de conglomerante los morteros pueden clasificarse en morteros de cemento Portland, morteros de cemento de aluminato de calcio (CAC), mortero de cal, mortero bastardo de cemento Portland y cal aérea o mortero bastardo de yeso y cal. Además, existen otros morteros que se pueden considerar especiales por los productos que se le añaden o por sus propiedades particulares como son, los morteros con aditivos (colorantes aceleradores de fraguado, retardadores de fraguado, plastificantes, impermeabilizantes, etc.); morteros ignífugos, con una resistencia al fuego elevada; morteros refractarios, resistentes a las altas temperaturas, los cuales normalmente tienen en su composición cemento de aluminato de calcio y arena basáltica o volcánica; morteros ligeros, compuestos por áridos ligeros; morteros sin finos, caracterizándose por ser porosos y filtrantes; morteros de rellenos; morteros autonivelantes; proyectados; monocapas, utilizados en el revestimiento de fachadas principalmente; o morteros de cemento – cola, empleados en la colocación de alicatados (Canal Materiales de Construcción, 2019).

Para todos los morteros se emplean cementos cuya clase resistente no es superior a 32.5 N/mm².

Morteros de cemento:

Los morteros de cemento son aquellos que emplean como aglomerantes los cementos naturales o Portland. Se caracterizan por tener elevadas resistencia y endurecer rápidamente, por lo que el tiempo entre su amasado y colocación debe ser el menor posible. Su trabajabilidad, resistencia y calidad

están estrechamente relacionadas con la dosificación y características de sus componentes. Estos morteros presentan una baja retención de agua, por lo tanto, son vulnerables al agrietamiento.

Los morteros de cemento suelen emplearse en la reparación y nivelación de superficies deterioradas de hormigón, macizado de bloques de hormigón, revestimientos de muros, juntas de elementos prefabricados, rellenos de grietas y fisuras, como base para la fijación de paneles sobre hormigón, apoyos para la colocación de ventanas y puertas, agarre de pernos, groutings, parcheo, protección de armaduras superficiales que amenazan la corrosión y reparación de dinteles, cornisas y voladizos (Puig, 2014).

Morteros bastardos de cemento y cal:

Estos morteros están constituidos por cemento, arena e hidrato de cal. La combinación de estos componentes le confiere al mortero altas resistencias iniciales y trabajabilidad. Su buena retención de agua evita grietas de contracción y hace que presenten una mayor plasticidad y adherencia.

Son los morteros más empleados tanto en la colocación de elementos (ladrillos, bloques, rasillas, celosías, etc.) como en el revestimiento de edificaciones, ya que permiten una mejor transpiración que los morteros de cemento, evitando problemas en las fábricas como son las humedades.

1.4. Propiedades de los morteros

Existen múltiples propiedades que pueden ser evaluadas en los morteros. Estas van estar influenciadas por las características de los materiales componentes, su comportamiento al interactuar entre ellos y sus dosificaciones. A continuación, se hará alusión a las principales propiedades tanto en estado fresco como endurecido. En capítulos posteriores se estudiará cómo influye la incorporación del vidrio reciclado en varias de ellas.

1.4.1. Propiedades en estado fresco

Consistencia

La consistencia se asocia a la manejabilidad o trabajabilidad de los morteros. La relación agua-cemento, la cantidad de áridos, así como la adición de aditivos son los factores que hacen que esta propiedad varíe en el material. La incorporación de cal a los morteros es una manera de mejorar su

trabajabilidad. Esta propiedad se determina a través de la medición del escurrimiento en la mesa de sacudidas.

Tiempo de utilización

El tiempo de utilización es el tiempo en que puede ser utilizado el mortero manteniendo una trabajabilidad adecuada sin necesidad de volver a añadir agua a la mezcla para evitar el endurecimiento por fraguado.

Tiempo abierto

Este concepto es aplicable principalmente a los morteros de cemento-cola. Se refiere al tiempo durante el cual es posible colocar las piezas sin dejar de cumplir con las especificaciones de adherencia.

Contenido de iones cloruro

La corrosión de armaduras y tuberías metálicas que se encuentren en contacto con la masa de mortero, así como la presencia de fluorescencias puede desencadenarse a causa de la existencia de iones cloruros solubles en el agua utilizada en el amasado del mortero (Chinchón, s.f.).

Para evitar esto, la UNE-EN 998-2:2018 limita el contenido de iones cloruros a un porcentaje inferior al 0.1% de la masa que tendría la muestra en seco (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2018).

Adherencia

La adherencia es la propiedad referida a la capacidad que puede o no tener un mortero para soportar las tensiones tangenciales o normales a la superficie de contacto entre el mortero y la pieza o soporte base donde se aplica, es decir, la resistencia que tiene el mortero a ser separado de este soporte. Esta propiedad del mortero en estado fresco está vinculada a la tensión superficial de la mezcla producto a las características reológicas de la pasta formada por el conglomerante (Alejandre, 2002).

Capacidad de retención de agua

Esta propiedad está estrechamente vinculada con la superficie específica del árido y el conglomerante y con la viscosidad de la pasta de manera general. El mortero conserva el agua necesaria para hidratar la superficie de sus componentes y rellenar las burbujas que deja el aire ocluido. El exceso de agua que tenga la mezcla será cedido por succión al soporte donde se aplique. La capacidad de retención de agua del mortero influye en la hidratación del

conglomerante y por tanto en otras propiedades como la consistencia y tiempo de utilización (Alejandro, 2002).

1.4.2. Propiedades en estado endurecido

Absorción de agua

Está definida como la relación que existe entre el peso del líquido que es capaz de absorber el mortero respecto al peso desecado del material.

Esta propiedad está relacionada con la compacidad del material y la red de poros que puede presentar. Mientras mayor sea la porosidad y menor la compacidad, es decir el mortero sea menos compacto, la absorción de agua será mayor. La adición de aditivos como los aireantes, plastificantes e hidrofugantes influyen en la disminución de la absorción.

Densidad

La densidad de un mortero va a depender fundamentalmente de las densidades de sus materiales componentes, la granulometría y la dosificación empleada. La relación agua-cemento es un factor importante que influye en la densidad de los morteros, mientras mayor sea esta la porosidad aumentará y, por tanto, la densidad disminuye.

Cuando se tienen morteros con densidades menores o iguales a $1\ 300\ \text{kg/m}^3$, se puede decir que son morteros ligeros.

Porosidad

La porosidad se entiende como el coeficiente entre el volumen de poros del mortero y su volumen aparente. Está estrechamente vinculada a las propiedades mecánicas y la durabilidad de los morteros.

Compacidad:

La compacidad es lo opuesto a la porosidad, por lo que es la relación entre la cantidad de materia sólida que tiene el mortero y su volumen aparente.

Resistencia mecánica

La resistencia mecánica es la capacidad que tiene el material para soportar esfuerzos externos sin sufrir la rotura. En el caso de los morteros, estos deben ser capaz de compartir las sollicitaciones de las piezas que une o el sistema constructivo que compone.

Los principales ensayos de resistencia que se le realizan a los morteros son a flexión y a compresión siguiendo el mismo procedimiento de la norma UNE-EN-196-1 para ensayos de resistencia del cemento.

Retracción

La retracción es la contracción que sufre la masa del mortero por el cambio de volumen que tiene lugar durante el fraguado y proceso de endurecimiento del material, donde se produce la pérdida del agua excedente de la hidratación.

Existen tres tipos de retracción: la plástica, la cual se produce debido a las tensiones provocadas por la rápida evaporación del agua durante el fraguado, conduciendo a la fisuración; la hidráulica o de secado, retracción que tiene lugar por la evaporación del agua una vez finalizado el fraguado y la térmica, debido a la reacción exotérmica producida por los granos de cemento durante el endurecimiento (Chinchón, s.f.).

Adherencia

La adherencia de un mortero está referida a la resistencia a la tracción de la unión que se crea entre dicho material y el soporte al que se le aplica. Esta propiedad está influenciada por varios aspectos, como son, las características de la propia mezcla del mortero, la pieza o superficie a la que se le añade y la preparación de esta, y la forma en que se aplica. Es una propiedad fundamental, ya que de ella dependerá que las piezas o el soporte y el mortero funcionen como un conjunto, influyendo en su resistencia e impidiendo el desprendimiento de las piezas de fábricas o la desprotección de los paramentos en caso de que haga función de revoco (Chinchón, s.f.).

La adherencia puede ser físico-mecánica o química. La tipo físico-mecánico está basada en la adhesión o trabazón entre los sólidos y depende de la porosidad y posibilidades de anclaje de la superficie, así como su capacidad de absorción de agua, ya que puede sustraer el agua del mortero e impedir la hidratación del cemento.

En el caso de la adherencia química está determinada por enlaces químicos que se forman entre la superficie del soporte y el mortero debido a la adición de aditivos, como en el caso de los morteros de cemento-cola.

Para la determinación de esta propiedad se realiza el ensayo de arrancamiento directo, normal a la superficie donde se aplica el mortero.

Comportamiento térmico

Esta propiedad es evaluada mediante la conductividad térmica, la cual indica la capacidad que tiene el material de transmitir el calor y se expresa como el cociente entre flujo de calor por unidad de tiempo y área, y el gradiente de temperatura. La conductividad térmica depende, entre otros factores, de la porosidad, densidad y contenido de humedad.

Durabilidad

La durabilidad es la propiedad que tiene un material de conservar las características necesarias para seguir cumpliendo con su funcionalidad ante la exposición a condiciones agresivas. Estas condiciones dependerán del ambiente donde se encuentre el mortero, por esta razón se suelen hacer ensayos de deterioro acelerado como son la cristalización de sales, la congelación y el choque térmico, evaluando el comportamiento del material ante estas situaciones.

2. JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN

El desarrollo económico y la globalización han conllevado a un uso irracional y desmedido de los recursos naturales agotables, provocando que su escasez y el deterioro medioambiental dentro de algunos años traiga consigo consecuencias nefastas tanto para el planeta, como para todos los seres vivos que en él habitamos.

Para evitar este desenlace, es necesario lograr la concientización y la responsabilidad por parte de los gobiernos, las instituciones y las personas en general, de manera que se actúe de un modo en que se satisfagan las necesidades actuales sin perjudicar las futuras. Este es el concepto de sostenibilidad, el cual implica, además, lograr un equilibrio entre el desarrollo económico, social y el cuidado del medio ambiente.

La aplicación del concepto de sostenibilidad, economía circular y la regla de las 5 rs (reducir, reciclar, reutilizar, reparar y recuperar), forman parte de un comportamiento responsable y comprometido con el tema y tienen que estar presente en nuestros hábitos, actividades y actuaciones como integrantes de esta sociedad, profesionales, investigadores o simplemente seres vivos que pertenecemos a este planeta al que llamamos Tierra.

En la construcción, las materias primas de los materiales que se utilizan, provienen de recursos naturales agotables. Los áridos forman parte de este tipo de recursos; provienen de la explotación de canteras y son componentes de varios de los materiales más empleados en el sector, como son los hormigones y morteros.

Por otra parte, el vidrio es un material con cifras de reciclaje considerables en Europa y en España; es un material 100% reciclable y con cierta facilidad para su tratamiento. Sus propiedades semejantes a la de la arena, lo han convertido en un posible sustituto de la misma en la producción de materiales de construcción con el fin de reducir su impacto ambiental.

El departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación de la Universidad de Sevilla, desde hace algunos años viene desarrollando dentro de sus líneas de investigación, el estudio de la influencia de la sustitución de la arena por vidrio

reciclado en morteros. Este trabajo, es una continuación de esta línea de investigación, por lo que el interés científico es la primera motivación para su realización.

En segundo lugar, resultados que validen que la sustitución en determinada proporción del árido por vidrio reciclado en morteros es viable, puede significar una futura disminución de los costos de producción de estos materiales y un ahorro de materia prima. Además, la incorporación del vidrio en mezclas de morteros generará una reducción de los desechos y por tanto de la contaminación medioambiental. Por todo esto, se puede decir que la motivación socio-económica es otro de los incentivos de esta investigación.

Por último, la posibilidad de participar en un proyecto de investigación que, por su vigencia, su alcance económico, social y sobre todo medioambiental, podría llegar a tener una repercusión importante en el sector, producen en el autor un interés profesional, además de la motivación personal que puede generar en toda persona comprometida con el cuidado del planeta y la construcción de un futuro mejor.

3. ESTADO DE LA CUESTIÓN. UN ACERCAMIENTO A LA UTILIZACIÓN DE VIDRIO RECICLADO EN HORMIGONES Y MORTEROS

Para los investigadores y profesionales del sector de la construcción, resulta atractiva la posibilidad de contar con materiales con menores costos de producción, sin perjudicar su calidad y prestaciones, al mismo tiempo que sean amigables con el medio ambiente. Debido a esto, desde hace algunos años varias investigaciones se han enfocado en esta temática, evaluando la factibilidad de la incorporación de materiales reciclables en sustitución a materias primas empleadas en la elaboración de materiales tradicionales con extenso uso en las construcciones, como son los hormigones y morteros. El vidrio reciclado para estas prestaciones supone ventajas notables, debido a sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, ser un material totalmente reciclable y con una alta disponibilidad.

La incorporación del vidrio como sustituto del cemento o del árido han sido las dos tendencias fundamentales que han marcado esta línea de investigación, tanto en los morteros como en los hormigones. A pesar de que este trabajo tiene como objeto de estudio la variación de las propiedades de morteros con la sustitución parcial del árido por vidrio triturado, resulta interesante para esta investigación el análisis de fuentes bibliográficas que hagan referencia a cada tendencia. Además, las conclusiones obtenidas en el estudio de los hormigones con incorporación de vidrio podrían, en cierta medida, extrapolarse a los morteros, debido a la presencia de materiales comunes en su composición.

3.1. Utilización del vidrio reciclado como sustituto del cemento o árido en hormigones

Según Shayan y Xu (2004), la inestabilidad del vidrio en el entorno alcalino del hormigón podría causar problemas de reacción álcali-sílice; sin embargo, la incorporación de polvo de vidrio fino como material puzolánico puede suprimir la reactividad alcalina de las partículas de vidrio más gruesas, así como la de los agregados reactivos naturales. Los autores concluyeron que el polvo de vidrio fino podría actuar como sustituto del cemento o de los áridos en el hormigón en porcentajes de sustitución de hasta un 30%, sin presentarse efectos negativos a largo plazo.

Khatib et al. (2012) y Nassar y Soroushian (2012) en sus investigaciones mostraron que había un aumento sistemático del asentamiento a medida que aumenta el contenido de polvo de vidrio en la mezcla. Esto podría atribuirse a la baja absorción de agua del vidrio. Kumarappan (2013) en su estudio llegó a las mismas conclusiones. En sus resultados obtuvo que el asentamiento osciló entre unos 40 mm para la mezcla de referencia (es decir, 0% de polvo de vidrio) a 160 mm con un 40% de polvo de vidrio.

Jangid y Saoji (2014) y Vandhiyan et al. (2013) concluyeron en sus investigaciones que la trabajabilidad de la mezcla disminuye a medida que aumenta la sustitución de cemento por polvo de vidrio, debido al incremento de la superficie del polvo de vidrio y también a la forma angular de las partículas de vidrio.

Bajad et al. (2011) estudiaron las propiedades de resistencia del vidrio cuando se somete a un ataque de sulfato y mostraron que la resistencia máxima a la compresión se alcanza con un 20% de sustitución del cemento por residuos de vidrio en polvo, en hormigones que están o no sometidos al ataque de sulfatos.

Khatib et al. (2012) estudiaron el rendimiento del hormigón con sustitución parcial del cemento y concluyeron que la máxima resistencia a la compresión se produce en torno al 10% de polvo de vidrio y más allá del 10% tiende a disminuir, siendo inferior a la mezcla de control. Por otra parte, Jangid y Saoji (2014) concluyeron que hasta el 20% de sustitución del cemento, la resistencia a la compresión aumenta hasta un 30% y que con porcentajes de sustitución mayores disminuye.

Vasudevan y Kanapathy Pillay (2013) realizaron ensayos a 7, 14 y 28 días de curado de especímenes que contenían polvo de vidrio de desecho como reemplazo parcial del cemento y sus resultados mostraron que la cantidad de mezcla de polvo de vidrio del 20% muestra un valor positivo de resistencia a la compresión a los 28 días en comparación con otras proporciones. Vandhiyan et al. (2013) estudiaron la sustitución del cemento por polvo de vidrio de desecho y concluyeron que hay un aumento considerable de resistencia temprana particularmente en el espécimen del 15% con un aumento del 29% en la resistencia al 7º día con relación al espécimen de control. A los 28 días esta

diferencia de resistencia se reduce al 23% y el mayor incremento de la resistencia a la compresión se logra con porcentaje de sustitución de un 10%. Kumarappan (2013) sustituyó parcialmente el cemento por polvo de vidrio y afirmó que hasta el 10% es factible la sustitución, ya que mostró una mayor resistencia a la compresión que la mezcla de control. Vijayakumar et al. (2013) propusieron que el cemento sustituido hasta el 40% por polvo de vidrio mostró un incremento en la resistencia a la compresión tanto a los 28 días como a los 60 días de curado en comparación con el hormigón convencional.

Peñafiel (2016) estudió la sustitución del vidrio molido reciclado por la arena como agregado fino, para lo que fabricó muestras con porcentajes del 10%, 20%, 30% y 40% de reemplazo de la arena, ensayando a compresión las probetas a las edades de 7, 14 y 28 días. Como resultado se obtuvo que para la edad de 7 días la resistencia a compresión disminuye con el aumento de la sustitución del árido, en cambio para las edades de 14 y 28 días con porcentajes de sustitución de hasta un 40% de vidrio molido por la arena se obtuvieron resistencias mayores a las de un hormigón de 21 MPa.

Paredes (2019) en su investigación analizó el efecto de la sustitución parcial en peso del agregado fino en concretos de 21 MPa por vidrio reciclado molido, en porcentajes de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30% de reemplazo. De los ensayos a compresión realizados a los 7, 14 y 28 días de curado, se concluyó que el 15% de sustitución es el porcentaje para el cual se obtiene el mayor incremento de resistencia en comparación con los otros porcentajes estudiados y con la muestra de control.

De los Ángeles et al. (2020) en su artículo analizan la influencia de la sustitución tanto de la arena como del cemento por vidrio molido. Para esto se elaboraron mezclas con remplazo de 25%, 50% y 100% para la arena y de 10 %, 20 % y 30 % para el cemento. De los resultados obtenidos de los ensayos a compresión realizados en el laboratorio se concluyó que es factible remplazar la arena por vidrio molido en un 25% y el cemento hasta un 20%, sin que se perjudique la resistencia de los hormigones tradicionales, normada en Cuba entre 25 MPa y 35 MPa.

Por otra parte, Jangid y Saoji (2014) concluyeron que la resistencia a la flexión aumenta con una sustitución de hasta un 35% de cemento por polvo de

vidrio de desecho en comparación con la mezcla de control con un incremento máximo del 20% en la resistencia y que con porcentajes de sustitución superiores la resistencia disminuye.

Soliman y Tagnit-Hamou (2016), Hendi et al., (2019) y Małek et al. (2021) expusieron que la utilización del vidrio en sustitución de la arena reduce la absorción de agua de las mezclas de concreto, por lo que la mayoría de sus propiedades mecánicas mejoran.

3.2. Utilización del vidrio como sustituto del cemento o árido en morteros

Marco et al. (2012) investigó la influencia en la resistencia de la incorporación de polvo de vidrio y otros compuestos químicos en las mezclas de morteros, evidenciándose en sus resultados que el polvo de vidrio utilizado como principal conglomerante actúa de manera favorable en la resistencia a compresión de las probetas ensayadas.

Nwaubani y Poutos (2013) concluyeron que el aumento de la cantidad de vidrio en el mortero provoca una disminución general de la resistencia a la compresión, pero la disminución se hace menos evidente con un tiempo de curado prolongado y que la distribución del tamaño de las partículas del vidrio de desecho utilizado fueron el factor clave que influyó en el desarrollo de la resistencia.

Guo et al. (2018) estudió la consecuencia que tiene la sustitución al 100% de la arena por vidrio triturado en la resistencia de morteros de cemento, obteniéndose como resultado que no es aconsejable el remplazo total de este componente ya que se ven afectadas las propiedades mecánicas.

Cabrera et al. (2018) realizó una investigación en la que se analizó en un mortero de cemento de dosificación 1:4 en peso, las propiedades físicas y mecánicas al incorporar como sustituto parcial de la arena el vidrio triturado en porcentajes de 0%, 15%, 30%, 60% y 100%, llegando a la conclusión por los resultados obtenidos que, con relación a la arena, el vidrio triturado presenta menor absorción de agua. Además, para todos los porcentajes de sustitución, las propiedades mecánicas se vieron afectadas, arrojando valores inferiores al mortero patrón, con la mayor resistencia para el 15% de sustitución.

Por otra parte, Gorospe et al. (2019), utilizaron porcentajes de remplazo de 30% y 50% del agregado fino por vidrio triturado y vidrio expandido y llegaron a

la conclusión que la trabajabilidad de la muestra se ve afectada por el tamaño de las partículas del vidrio. En cuanto a la resistencia, para los dos porcentajes analizados los valores resultaron inferiores a los obtenidos en la muestra de control, siendo menor para el mortero con 50% de reemplazo.

En su investigación, Tuam et al. (2018), también obtuvieron menores valores de resistencia a compresión y flexión para todos los porcentajes y las edades de curado analizadas, y un incremento en la fluidez de la mezcla al aumentar la cantidad de material vítreo triturado.

Sin embargo, Malek et al. (2020) en el estudio de morteros con sustitución del agregado fino por vidrio triturado reciclado, de cuatro porcentajes de reemplazo analizados (5%, 10%, 15% y 20%), obtuvo una mejoría en las propiedades mecánicas con respecto al mortero de referencia en todos los casos, incrementándose con el aumento de la cantidad de vidrio utilizada, teniendo el mortero con 20% de sustitución un incremento de un 29% en la resistencia a compresión y un 14% en la resistencia a flexión.

Gorospe et al. (2020) investigan la influencia que tiene la sustitución de la arena por vidrio triturado en porcentajes superiores al 30% y hasta llegar a un 100%, en morteros de cemento con dosificación 1:2 en peso y arena natural con tamaños de partícula que van de 75 μm a 2 360 μm y módulo de finura de 2.63. Los ensayos fueron realizados a los 28 días y los resultados obtenidos llegaron a concluir que se produce una reducción de la resistencia para todos los casos con respecto a la muestra de referencia y que los valores decrecen a medida que aumenta la cantidad de vidrio. Por otra parte, los autores consideran favorable, la reducción de la absorción de agua que se experimenta, llegando a un 31% para el 100% de sustitución, lo que minimiza la aparición de grietas hasta un 98%.

Lu y Poon (2018) en su estudio exponen que los morteros con incorporación de vidrio triturado como sustituto de agregados naturales produce una mejora en la trabajabilidad de la mezcla y tienen una mejor respuesta a altas temperaturas. Sin embargo, también concluyen que a mayor porcentaje de sustitución las resistencias a la flexión y la compresión son menores.

Corinaldesi et al. (2016) estudiaron el comportamiento de morteros con empleo de polvo de vidrios reciclados de diferentes colores (verde, ámbar y

transparente) y edades del curado, alcanzando de manera general valores hasta un 80% mayores en las propiedades mecánicas a los 180 días con respecto a los resultados obtenidos a los 28 días. Además, no se recomienda porcentajes de sustitución mayores al 50% de vidrio transparente y en cuanto al vidrio de color verde y ámbar, los dos presentaron en todos los casos una disminución de las propiedades mecánicas.

Jing et al. (2020), estudiaron la consistencia y permeabilidad de los morteros en los que se empleó el vidrio triturado como sustituto del árido y el polvo de vidrio como remplazo del cemento, concluyendo que la permeabilidad aumenta con la incorporación del vidrio debido a que se forman mayor cantidad de poros; además, la resistencia se ve más afectada a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, llegando a ser un 55% menor que el mortero base para un 100% de reemplazo.

En cambio, Liu et al. (2019) concluyeron en su investigación que la utilización de vidrios reciclados mejora las propiedades de los morteros en estado fresco y presenta mayor resistencia a las elevadas temperaturas y al ataque químico.

En la Universidad de Sevilla se han llevado a cabo varias investigaciones donde se ha evaluado el comportamiento de los morteros ante la incorporación de vidrio reciclado triturado en la mezcla.

Flores et al. (2018) analizan en su estudio las variaciones que, en un mortero de referencia con dosificación en peso 1:3 (cemento/arena), produce el remplazo del árido por el material vítreo triturado procedente de residuos domésticos. Los porcentajes de sustitución empleados son del 25% y 50% en peso. En este estudio se hizo una caracterización del mortero después del curado a temperatura ambiente y luego del calentamiento a 600°C y 800°C, llegando a resultados que demuestran que existe un mejor comportamiento ante altas temperaturas en los morteros con incorporación de vidrio triturado en su composición.

Flores et al. (2020a) en su investigación estudian las propiedades mecánicas a temperatura ambiente y tras un proceso de calentamiento de 800°C de morteros con incorporación de vidrio triturado de procedencia doméstica como sustitución a la arena en porcentajes de 10%, 25% y 50%. Los resultados

se evaluaron mediante la prueba *t* de Student y mostraron diferencias estadísticamente significativas en los valores de resistencia. De la comparación de los valores obtenidos de resistencia a flexión en el mortero de referencia y los que incluían el vidrio triturado como sustitución de la arena, se concluyó que la mejora en la resistencia no fue significativa con excepción de las muestras con una sustitución del 25%. Por otra parte, después de ser sometidas al calentamiento, a pesar de haber una disminución de la resistencia a flexión, las muestras con incorporación de vidrio triturado presentaron un mejor comportamiento con respecto a la muestra de referencia. En cuanto a la resistencia a compresión no se observaron mejoras en los morteros con incorporación de vidrio con respecto al mortero patrón, tanto a temperatura ambiente como después de ser sometidos a 800°C de calentamiento. Además, los morteros con agregado de vidrio molido también mostraron un decrecimiento del coeficiente de conductividad térmica y de la difusividad térmica, lo que refleja un comportamiento positivo en relación a su respuesta térmica y capacidad de aislamiento. Las estructuras internas del mortero no se vieron afectadas por la incorporación del vidrio molido.

Flores et al. (2020b) analiza la repercusión que tiene la rehidratación forzada de morteros a base de vidrio reciclado después de someterse a un proceso de calentamiento a alta temperatura, empleando cemento CEM I 42.5R. Sus resultados mostraron el efecto favorable del vidrio triturado tras una degradación térmica y el posterior tratamiento de rehidratación. El material rehidratado a base de vidrio reciclado desarrolla una capacidad de recuperación mecánica 6.2 veces superior a la del convencional, debido a la activación térmica y alcalina de la sílice amorfa, que favorece la nueva formación de silicatos hidratados manifestado en el incremento del coeficiente de excentricidad de los poros.

Alducin et al. (2021) estudian el comportamiento de los morteros con sustitución parcial de árido por vidrio reciclado, frente a los ensayos de deterioro acelerados, como la cristalización de sales, la congelación y el choque térmico. Del análisis de los resultados de las propiedades físicas y mecánicas básicas estudiadas, se observó una mejora significativa en la resistencia ante la acción expansiva de la cristalización de la sal en morteros con incorporación de vidrio

triturado como sustituto de la arena. A través de ensayos de ultrasonidos y su correlación con el módulo de Young, analizaron los procesos de alteración de la estructura interna. Los valores obtenidos estuvieron en el rango de materiales similares, teniendo las muestras sometidas a la prueba de congelación un mayor grado de deterioro. Además, estudiaron la estructura interna mediante microscopía electrónica de barrido, observando en las muestras sometidas a ensayos de cristalización de sales una mayor homogeneidad y un menor grado de microfisuración en las interfaces agregado/pasta de los granos de vidrio.

El análisis de la bibliografía y los antecedentes investigativos existentes hasta el momento respecto al tema objeto de este trabajo, muestran discrepancia de criterios en cuanto a la variación de las propiedades de hormigones y morteros con incorporación de vidrio reciclado en su composición y al porcentaje de sustitución de cemento o arena más adecuado. Esta diversidad en los resultados puede estar asociadas a las diferencias en cuanto a dosificaciones, tamaño de partículas de vidrio, tipo de cemento y características de los materiales utilizados, procedimiento para la preparación y ensayo de las probetas y a la propia variedad de porcentajes de reemplazo estudiados, entre otros factores. A pesar de la divergencia existente, la mayoría de los autores plantean la utilización de vidrio procedente del reciclado en el diseño de mezclas de hormigones y morteros como una opción viable y sostenible. Los estudios llevados a cabo por el grupo de investigación que lidera este trabajo en la Universidad de Sevilla, han mostrado un comportamiento favorable de los morteros de cemento con incorporación de vidrio triturado ante altas temperaturas y capacidades de recuperación después de la rehidratación, por lo que resulta interesante validar estos resultados con otras investigaciones que mantengan los materiales y la metodología empleada hasta el momento y haciendo sólo modificaciones en las variables que se necesiten estudiar. Además, del estudio del estado de la cuestión, se pudo observar que existe una laguna en cuanto a la posibilidad del aprovechamiento del vidrio como sustituto del árido en morteros bastardos, los cuales tienen un amplio uso en la construcción, resultando una nueva línea de investigación interesante.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento físico, mecánico y mineralógico de morteros de cemento y bastardos cuyo árido se encuentra parcialmente sustituido por vidrio triturado procedente del reciclado.

4.2. Objetivos específicos

1. Realizar la caracterización mineralógica, a temperatura ambiente y a 800°C para evaluar las posibles transformaciones mineralógicas.
2. Determinar las propiedades físicas (densidad y porosidad) a temperatura ambiente y a 800°C.
3. Obtener la velocidad de transmisión de ultrasonido, a temperatura ambiente y a 800°C, para evaluar las posibles transformaciones de la estructura interna del material que puedan influir en las propiedades físicas.
4. Evaluar el comportamiento mecánico a través de los ensayos de flexión y compresión, a temperatura ambiente y a 800°C.

5. METODOLOGÍA Y FASES DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo se trata de una investigación cuantitativa, por lo que se identificaron 3 fases fundamentales: una primera fase conceptual que ha sido desarrollada en apartados anteriores y las fases metodológica y empírica, las cuales serán abordadas posteriormente.

En la primera fase “Conceptual” se profundizó sobre el tema que se deseaba conocer para lograr la definición del problema y los objetivos de investigación, para ello se aplicaron como métodos el análisis bibliográfico y la síntesis para realizar un acercamiento al marco conceptual y los antecedentes investigativos referentes a la temática, que puedan contribuir a la toma de decisiones, la manera de proceder en esta investigación y la interpretación de los resultados en fases posteriores.

En la segunda fase “Metodológica” se estableció de qué manera se realizaría el estudio experimental. Se definió el tamaño de la muestra, las variables de investigación, materiales, procedimientos, equipamiento a utilizar, lugar donde se desarrollaría el procedimiento experimental y los tiempos en que se llevaría a cabo cada tarea.

En la tercera fase “Empírica”, se realizó la difusión de los resultados, primeramente, realizando una recopilación y agrupación de los mismos mediante la determinación de estadísticos descriptivos como la media y la desviación típica para posteriormente llevar a cabo las comparaciones pertinentes que den respuesta al problema y los objetivos de la investigación planteados en las fases anteriores. Para comprobar que los resultados obtenidos no se hayan debido al azar, se empleó el contraste de hipótesis como prueba estadística. Finalmente, de la interpretación de los resultados obtenidos se establecieron semejanzas con otras investigaciones, los hallazgos novedosos y futuras líneas de investigación que se podrían desarrollar.

A continuación, se muestra un esquema que resume las fases, los métodos empleados y tareas que comprende cada una de ellas (Figura 5.1).

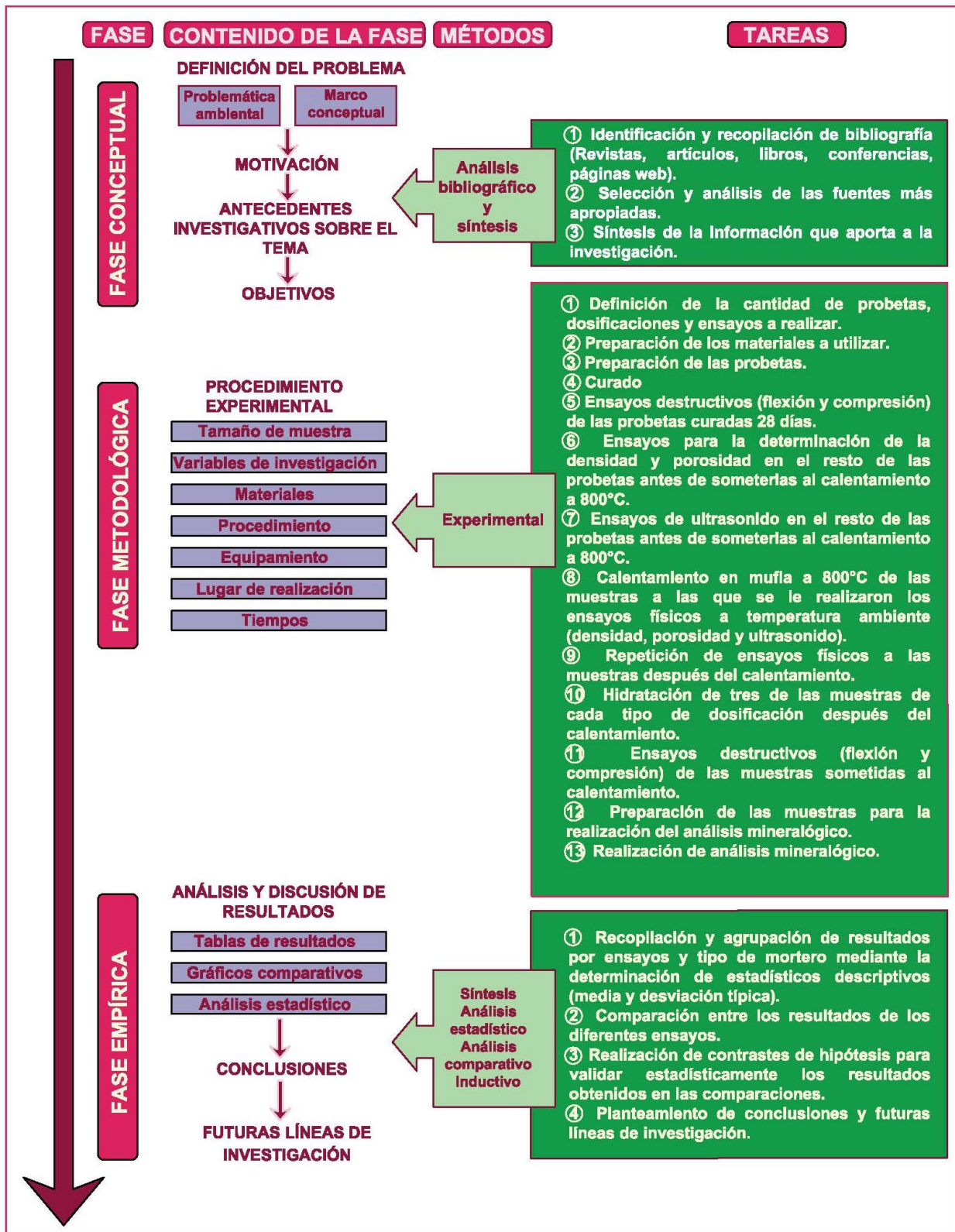


Fig. 5.1: Esquema descriptivo de la metodología seguida en la investigación

Fuente: Elaboración propia

5.1. Proceso experimental

Para poder evaluar la viabilidad del uso del vidrio reciclado como sustitución de componentes en hormigones o morteros de albañilería, se requiere de resultados experimentales que demuestren que esta modificación no afecta significativamente las propiedades requeridas para el uso de estos materiales en la construcción. Como se ha descrito en investigaciones precedentes, el método más sencillo y con un procedimiento técnicamente correcto es la comparación entre los resultados obtenidos en morteros u hormigones tradicionales sin incorporación de vidrio y los que sustituyen en cierta proporción el árido o el cemento por el agregado vítreo. En este capítulo se describirá el procedimiento experimental desarrollado en esta investigación, donde se han llevado a cabo un grupo de ensayos para obtener determinadas propiedades en morteros tradicionales de cemento y bastardos, y morteros con una sustitución de un 25% del árido por vidrio reciclado en cada uno de los casos, para realizar posteriormente las comparaciones necesarias.

El procedimiento experimental llevado a cabo en esta investigación para la preparación de las probetas y determinación de las propiedades mecánicas está recogido en la norma UNE-EN 196-1: “Métodos de ensayo de cementos, determinación de resistencias” (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2018), mientras que la determinación de las propiedades físicas se basó en la norma UNE-EN 1936:2007 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2007). Todos los experimentos fueron realizados en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación y en el Centro de Investigación Tecnología e Innovación de la Universidad de Sevilla (CITIUS), con la supervisión de los profesionales encargados del área y profesores e investigadores del departamento de Construcciones Arquitectónicas II de la Universidad de Sevilla.

5.1.1. Tipos de morteros y cantidad de probetas preparadas para ensayar

El procedimiento consistió en la elaboración de cuatro morteros diferentes, dos morteros de cemento y dos bastardos (de cemento y cal) donde el parámetro de variación en cada uno de los casos fue la sustitución o no del 25% del árido por material vítreo reciclado:

- Mortero de cemento de referencia (MCR)

- Mortero de cemento con un 25% de sustitución del árido por vidrio reciclado (MC25)
- Mortero bastardo de referencia (MBR)
- Mortero bastardo con un 25% de sustitución del árido por vidrio reciclado (MB25)

Se ha decidido asumir un 25% de sustitución del árido por material vítreo, ya que en investigaciones precedentes (Flores et al., 2018; Flores et al., 2020a; Alducin et al., 2021) se ha llegado a la conclusión que este porcentaje no implicaría variaciones significativas en las propiedades de los morteros e incluso podría conducir a mejoras de las mismas.

Se elaboraron para cada tipo de mortero 6 probetas para ser ensayadas tras 28 días de curado y otras 6 que, pasado este tiempo, se sometieron a calentamiento en mufla a 800°C para ser ensayadas posteriormente con el objetivo de evaluar la variación de sus propiedades. De esta manera se prepararon 12 muestras por mortero, para un total de 48 muestras en esta investigación. De las 24 probetas que fueron sometidas a calentamiento, 3 probetas de cada tipo de mortero (12 muestras en total) fueron hidratadas posteriormente. Para un mejor entendimiento, en el Anexo A, se detallan los tipos de morteros y cantidad de probetas elaboradas.

5.1.2. Materiales

Los materiales empleados son los utilizados normalmente en la elaboración de los morteros tradicionales: cemento, arena, agua y en el caso del mortero bastardo, además la cal. Para los morteros con incorporación de vidrio, se utilizan estos materiales como componentes principales, solamente se sustituyó la arena en el porcentaje antes mencionado (25%) por el material vítreo con igual granulometría que la arena que sustituye. Todos los materiales para la elaboración de las probetas fueron aportados por el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, cumpliendo con los requerimientos establecidos en la normativa aplicable (UNE-EN 196-1: “Métodos de ensayo de cementos, determinación de resistencias”).

La descripción de cada uno de estos componentes se detalla a continuación.

Cemento

El cemento empleado fue CEM II/B-L 32.5R, cemento portland con caliza de resistencia media 32.5 MPa a 28 días.

Cal

En los morteros bastardos se empleó la cal hidratada YEMACONSA CL 90 S, la cual tiene como fin la preparación de morteros de albañilería, revoco y enlucidos; además de su utilización en la fabricación de otros productos de construcción y en el tratamiento de suelos y en mezclas asfálticas.

Árido natural

Como árido natural, se utilizó en la preparación de todas las muestras la arena normalizada suministrada por el Instituto Eduardo Torroja, empaquetada en bolsas con un peso de 1 350 (\pm 5) gramos (arena CEN estándar EN 196-1:2018) con un grado máximo de humedad del 0.2% (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2018). Esta arena presenta una distribución granulométrica donde los tamaños de grano se encuentran en el rango de entre 0.08 y 2.00 mm. Realizado el estudio granulométrico de la misma, según la norma UNE EN 933-1:2012 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2012) empleando tamices definidos por la norma UNE EN 933-2:1996 (0.063, 0.125, 0.250, 0.50, 1.00, 2.00 mm) (Asociación Española de Normalización y Certificación, 1996), la distribución granulométrica se representa en la Figura 5.2, que pone de manifiesto que la arena es ligeramente más gruesa que la curva de Fuller.

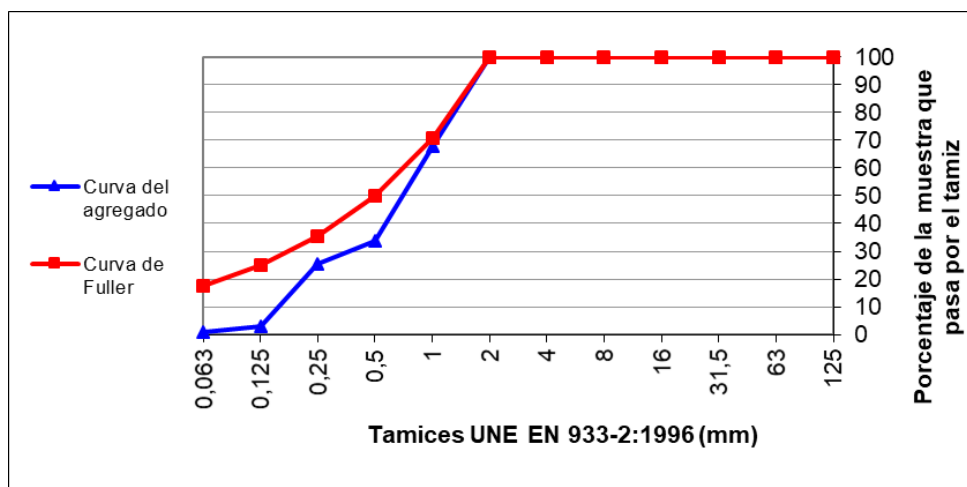


Fig. 5.2: Granulometría de la arena normalizada y del vidrio triturado

Fuente: Elaboración propia

Vidrio reciclado

En los morteros con sustitución del 25% del árido por material vítreo se empleó granulado de vidrios provenientes de residuos domésticos, principalmente envases comunes, este material fue triturado en una trituradora de mandíbulas y tamizado hasta un tamaño de partícula inferior a 2 mm. Se separaron las diferentes fracciones granulométricas empleando tamices UNE-EN 933-2:1996 (0.063, 0.125, 0.250, 0.50, 1.00, 2.00 mm) (Asociación Española de Normalización y Certificación, 1996), que posteriormente fueron distribuidas con las mismas proporciones de la arena, para preparar un agregado de sustitución con una granulometría continua igual que la de la arena normalizada representada en la Figura 5.2.

5.1.3. Dosificaciones

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

La relación agua/cemento fue de 0.5 según lo establecido en la EN 196-1:2018 para los morteros de cemento. En el caso de los morteros bastardos se requirió incrementar la relación agua/conglomerante a 0.6 para obtener una trabajabilidad óptima de la mezcla (Ver Tabla 5.1).

Tabla 5.1: Dosificaciones empleadas por amasadas en la fabricación de los cuatro tipos de morteros

Tipo de Mortero	Cemento (g)	Cal (g)	Arena (g)	Vidrio(g)	Agua (g)
MCR	900	-	2 700	-	450
MC25	900	-	2 025	675	450
MBR	600	300	2 700	-	540
MB25	600	300	2 025	675	540

Fuente: Elaboración propia

5.1.4. Procedimiento para la elaboración de las muestras

Con las dosificaciones anteriores se prepararon series de 12 probetas de 40x40x160 mm para cada tipo de mortero. Después de tener todos los materiales pesados y listos para preparar la mezcla se comenzó el proceso de amasado.

Primeramente, se vertió el agua y el cemento dentro del recipiente, cuidando de que no existieran pérdidas de ninguno de estos dos componentes y

completando el vertido en 10 segundos. En el caso de los morteros bastardos se vertió la cal junto con el cemento. Después de concluir este paso se fijó inmediatamente el “tiempo cero” y se puso en marcha la amasadora a una velocidad lenta durante 30 segundos. Una vez pasados los 30 segundos de amasado, se comenzó a añadir de manera regulada la arena o la mezcla homogénea de la arena y el porcentaje de vidrio reciclado de sustitución, según el tipo de mortero que se estuviese preparando (Figura 5.3). Tras transcurrir este tiempo, se puso la amasadora en velocidad rápida y se continuó amasando durante 30 segundos más. Posteriormente se paró la amasadora por 30 segundos en los que se limpió las paredes del recipiente con la espátula de goma y se volvió a verter los restos en el centro del recipiente, para después continuar amasando por 60 segundos con velocidad rápida y de esta manera se concluye el proceso de amasado.



Fig. 5.3: Amasado de la mezcla antes de pasar a velocidad rápida

Fuente: Elaboración propia

Una vez preparado el mortero se procedió al llenado de los moldes de inmediato. Estos moldes disponen de tres compartimentos horizontales, pudiéndose preparar tres probetas a la vez de dimensiones 40x40 mm de sección transversal y 160 mm de longitud. Además, se debe chequear que los mismos estén firmemente unidos a la mesa compactadora para evitar que se muevan o desarmen durante el proceso de compactación. También deberán

estar engrasados en su interior para facilitar el desmoldeado de las probetas y evitar que se produzca una ruptura de las mismas.

El vaciado de la mezcla en los moldes se realizó en dos partes; primeramente, con ayuda de una cuchara adecuada se introduce directamente, del recipiente de la amasadora, una capa en cada uno de los compartimentos de aproximadamente 300 g. Para ello, se extiende uniformemente la mezcla en el compartimento y se pasa la espátula grande, la cual mantenida verticalmente y con su parte más ancha en contacto con el borde superior de la tolva nos da la medida del espesor de esta primera capa (Figura 5.4a). Posteriormente se compactó esta capa de mortero con 60 golpes en la compactadora (Figura 5.4b). Para la segunda capa se repite el proceso, pero pasando esta vez la espátula más pequeña para retirar el excedente de mortero y se compacta con otros 60 golpes.

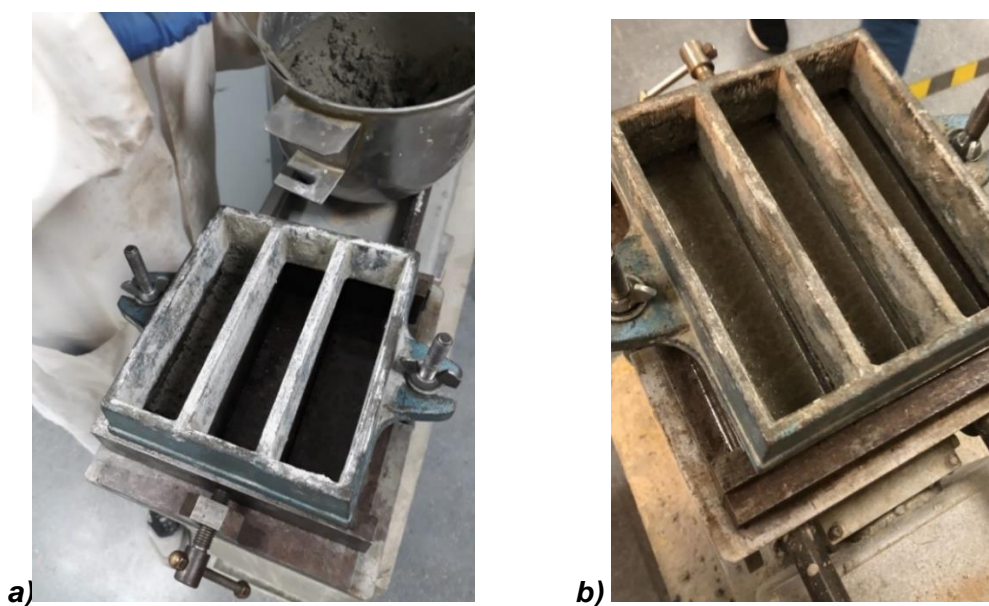


Fig. 5.4: Elaboración de las probetas, a) Llenado de primera capa, b) Primera capa después de la compactación

Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizada la compactación, se retiró con cuidado el molde de la mesa vibradora y se separó la tolva. Inmediatamente, para nivelar la superficie superior, se usó una regla manteniéndola casi vertical, pero inclinada en la dirección del movimiento, realizando movimientos transversales de sierra lentamente, una vez en cada dirección. Se repite el proceso con una regla plana, formando un ángulo más agudo para suavizar la superficie (Figura 5.5).

Para concluir, los moldes se etiquetaron y se cerraron en plástico para que no pierdan humedad durante 24 horas (Figura 5.6), llevándolos a la cámara de humedad, donde se colocaron sobre una superficie horizontal, sin apilarlos unos sobre otro y con condiciones óptimas de humedad (95%) y temperatura ($20^{\circ}\text{C}\pm 2$), cumpliendo con lo establecido en la norma UNE-EN 196-1:2018 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2018).



Fig. 5.5: Probetas en los moldes después de nivelar y suavizar la superficie

Fuente: Elaboración propia

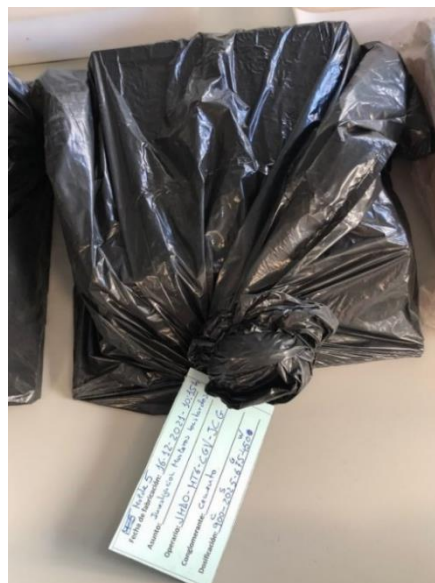


Fig. 5.6: Moldes etiquetados y cerrados en plástico antes de llevarlos a la cámara de humedad

Fuente: Elaboración propia

Transcurridas ese tiempo se llevó a cabo el desmoldeado sin dañar las probetas con ayuda de un martillo de goma. Para realizar el curado, se colocaron las probetas, marcadas adecuadamente, sobre emparrillados y separadas entre ellas, en depósitos previamente llenados con agua potable a una temperatura de ($20^{\circ}\text{C}\pm 1$). La habitación donde se conservaron mantenía una temperatura uniforme y una velocidad de flujo baja.

De las 12 probetas de cada tipo de mortero, seis se ensayan tras los 28 días de curado y las otras seis se sometieron, tras el curado, a calentamiento a 800°C durante 2 horas antes de proceder a realizar los ensayos (Figuras 5.7a y 5.7b).

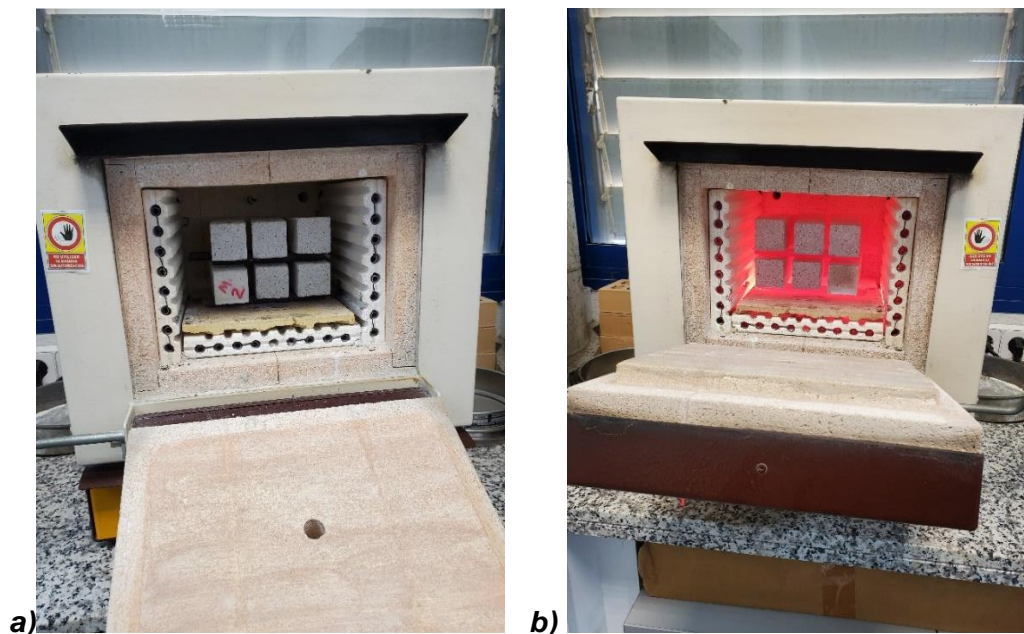


Fig. 5.7: Probetas en mufla, a) Antes de ser sometidas al calentamiento a 800°C, b) Después de ser sometidas al calentamiento a 800°C

Fuente: Elaboración propia

5.1.5. Procedimiento para la realización de los ensayos

5.1.5.1. Ensayos no destructivos

Velocidad de ultrasonido

Para evaluar las posibles transformaciones de la estructura interna del material que puedan influir en las propiedades físicas, se examinaron las muestras con un equipo ultrasónico. Las probetas estudiadas tenían dimensiones de 40x40 mm de sección y 140 mm de longitud, como resultado del corte efectuado a las originales para obtener las muestras de 40x40x20 mm que se sometieron a los ensayos físicos (densidad y porosidad), que serán explicados posteriormente.

El dispositivo utilizado fue el equipo Pundit Lab de la empresa Proceq, el cual consta de dos transductores que están conectados al sistema central. Uno de estos transductores emite pulsos ultrasónicos y el otro los detecta. Al ubicarse los dos transductores en las caras opuestas de una probeta, la onda ultrasónica viaja libremente o de manera tortuosa por la matriz cementicia desde un transductor a otro, en dependencia de la estructura interna de la muestra. Como resultado se obtiene el tiempo de propagación de una onda.

Antes de cada uso, el instrumento se calibró con ayuda de la barra de referencia, a la cual se le conoce el tiempo que tarda el pulso ultrasónico en recorrerla bajo una frecuencia sónica. Tanto para realizar la calibración como para realizar los ensayos en las probetas, los transductores fueron bien acoplados a las superficies, de modo que se evitara demoras o errores en las lecturas por las vibraciones involuntarias de las manos, para ellos se utilizó una capa delgada de vaselina en los transductores para garantizar la adherencia (Figura 5.8).

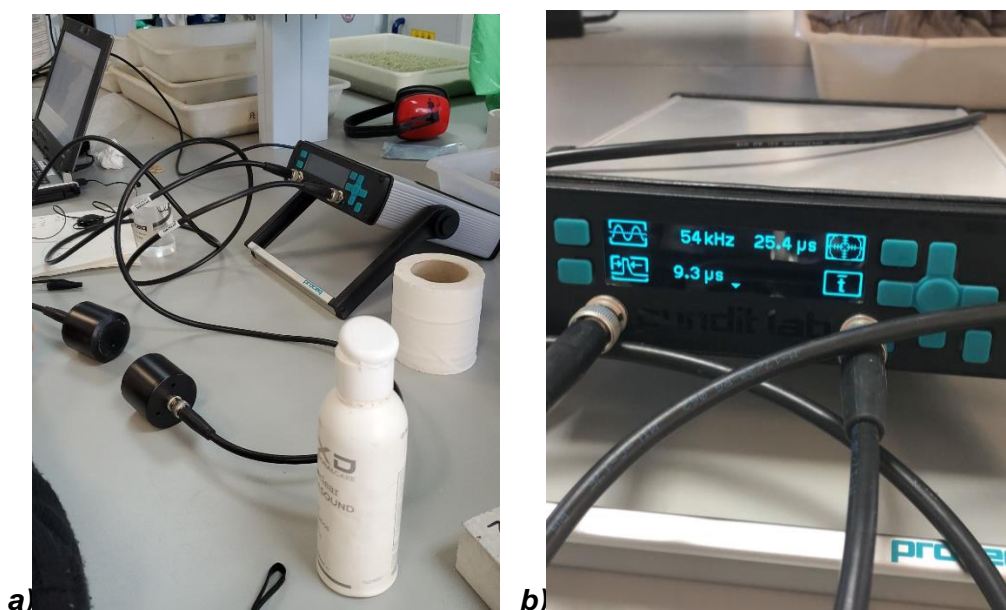


Fig. 5.8: Ensayos de ultrasonidos, a) Equipo y medios utilizados para la realización de los ensayos, b) Equipo calibrado

Fuente: Elaboración propia

Una vez calibrado el equipo se procedió a realizar las mediciones directas. De las 12 muestras elaboradas para cada tipo de mortero fueron ensayadas las probetas que serían sometidas a un proceso de calentamiento en mufla a 800°C (muestras de los moldes M2, M4, M6, M8, M10, M12, M14, M16). Los ensayos fueron realizados antes y después del calentamiento para evaluar la variación de sus propiedades. Las mediciones se realizaron en las tres direcciones espaciales (X, Y, Z). En la dirección longitudinal Y (140 mm) se tomó una lectura, mientras que en las transversales X y Z (40 mm) se tomaron dos por cada una (Figura 5.9), calculándose posteriormente la media de estos valores para el procesamiento de los resultados. El eje Z se consideró como la dirección de compactación de las probetas.

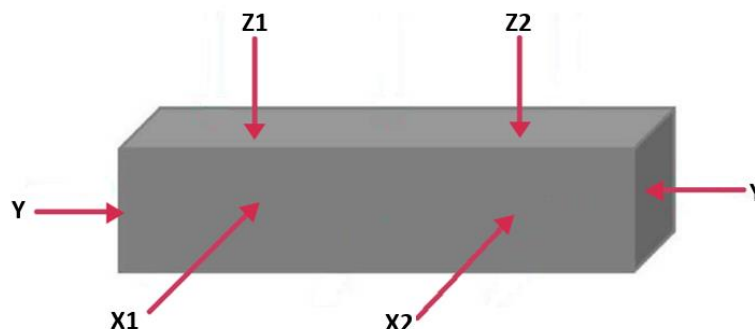


Fig. 5.9: Esquema de determinación de velocidades de ultrasonidos en muestras de 40x40x140 mm

Fuente: Elaboración propia

De los tiempos obtenidos y las longitudes de cada dirección se obtienen las velocidades de transmisión de las ondas; las medias de estas velocidades en cada dirección se asocian a la compacidad del mortero, mayores valores de velocidad indican un mortero más compacto y por tanto menos poroso.

Densidad y porosidad

La densidad aparente (D_a) y la porosidad abierta (P_a) se obtuvieron mediante el método de diferencia de pesadas. Para la determinación de estas propiedades, primeramente, se obtuvieron muestras de 40x40 mm de sección y 20 mm de longitud, resultado del corte de las probetas originales, como se mencionó anteriormente.

Estas muestras fueron sometidas a un proceso de secado en estufa a una temperatura de 100°C hasta obtener su peso seco constante (P_{seco}) posteriormente en la balanza (Figura 5.10).

Una vez obtenidos los pesos secos, se procede a la saturación con agua de la muestra al vacío durante 24 horas (Figuras 5.11) y posteriormente, se pesaron las muestras nuevamente para obtener los pesos saturados (P_{sat}), según la norma EN-1936:2007 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2007).

Tanto para determinar la densidad aparente (D_a) como la porosidad abierta (P_a), es necesario conocer el volumen aparente de cada muestra, siendo el volumen real del material más el volumen de poros. Este volumen es posible determinarlo mediante la obtención del peso saturado sumergido (P_w) en la balanza hidrostática (Figura 5.12).



Fig. 5.10: Pesado de muestra de mortero

Fuente: Elaboración propia



Fig. 5.11: Inmersión en agua de las probetas en recipiente al vacío

Fuente: Elaboración propia



Fig. 5.12: Determinación de los pesos saturados sumergidos mediante balanza hidrostática

Fuente: Elaboración propia

Luego de ser ensayadas las muestras a temperatura ambiente, se sometieron al proceso de calentamiento en mufla a 800°C, para volver a repetir el procedimiento explicado anteriormente.

Una vez obtenidos los pesos secos (P_{seco}), se procedió a saturar las muestras, esto condujo a la desintegración de varias de ellas al ser hidratadas, producto a la reacción expansiva álcalis-sílice. Las muestras que se pudieron rescatar y ser ensayadas fueron: 5 muestras del mortero de cemento de referencia, las 6 muestras del mortero de cemento con 25% de vidrio y 2 muestras del mortero bastardo con 25% de vidrio (Figura 5.13); ninguna muestra del mortero bastardo de referencia se pudo aprovechar para ser ensayada. La

ocurrencia de este fenómeno, que no había tenido lugar en las investigaciones anteriores, realizadas por la Universidad de Sevilla (Flores et al., 2018; Flores et al., 2020a; Alducin et al., 2021), en este caso se produjo por la utilización de un cemento diferente, con un mayor contenido calcáreo con respecto a los utilizados en los trabajos precedentes en los que se empleó el CEM I 42.5R o el CEM IV/B (V) 32.5N.



Fig. 5.13: Muestras recuperadas después de ser saturadas

Fuente: Elaboración propia

Con todos los pesos determinados se puede calcular la densidad aparente (D_a) y la porosidad abierta (P_a).

$$D_a = \frac{P_{seco}}{V_a} \text{ y } P_a = \frac{V_{poros\ accesibles}}{V_a}$$

donde:

D_a : es la densidad aparente (g/cm^3)

P_{seco} : es el peso seco (g)

V_a : es el volumen aparente (cm^3)

$V_{poros\ accesibles}$: es el volumen de poros accesibles (cm^3)

Según Arquímedes, todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del fluido desalojado.

Conociendo el peso del fluido desalojado y su densidad, podemos saber el volumen desalojado de este fluido que sería igual al volumen aparente de la muestra.

Por equilibrio de fuerzas:

$$E = P_{sat} - P_W$$

donde:

E: es el empuje o peso del fluido desalojado (g)

P_{sat} : peso saturado (g)

P_W : peso saturado sumergido (g)

Al ser el agua el fluido en cuestión, la densidad se toma igual a 1g/cm³, por tanto,

$$D_a = \frac{P_{seco}}{P_{sat} - P_W} \text{ y } P_a = \frac{P_{sat} - P_{seco}}{P_{sat} - P_W}$$

5.1.5.2. Ensayos destructivos

Resistencias mecánicas

Los ensayos de resistencias mecánicas se realizaron en todas las probetas elaboradas, excepto las que fueron hidratadas después del calentamiento, ya que se desintegraron de la misma manera que había ocurrido en la determinación de las propiedades físicas, con las muestras que fueron saturadas después de permanecer a 800°C en mufla.

Las probetas se desintegraron en el siguiente orden: primero, las probetas del molde M12 (MBR); en segundo lugar, las probetas del molde M4 (MCR); en tercer lugar, las probetas del molde M16 (MB25) y las probetas que más se resistieron al proceso de expansión y desintegración provocado por la reacción álcali-sílice, fueron las correspondientes al molde 8 (MC25) (Figura 5.14).

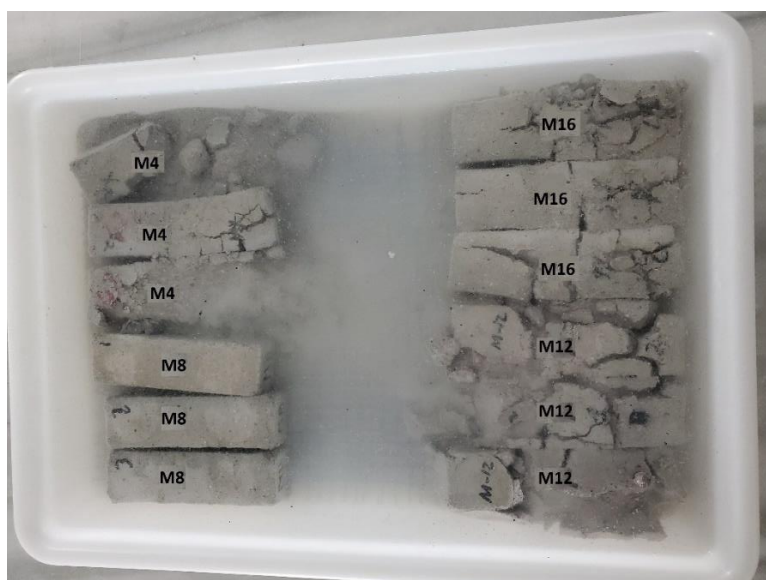


Fig. 5.14: Probetas deshechas al ser hidratadas después del calentamiento

Fuente: Elaboración propia

Resistencia a flexión

Para la realización de los ensayos de resistencia a flexión se utilizó el método de carga centrada, para el cual se empleó una máquina capaz de aplicar cargas hasta 10 kN, con una precisión de $\pm 1.0\%$ de la carga registrada en las 4/5 partes superiores del rango utilizado y con una velocidad de (50 ± 10) N/s. Esta máquina está provista de un dispositivo de flexión que incorpora tres rodillos de acero con longitudes entre 45 mm y 50 mm: dos rodillos de apoyo de (10.0 ± 0.5) mm de diámetro, distantes uno del otro (100.0 ± 0.5) mm y un tercero de carga del mismo diámetro que los otros dos y equidistantes de los anteriores.

El procedimiento consistió en la colocación de la probeta en la máquina de ensayo, con una cara lateral sobre los rodillos soporte y con su eje longitudinal perpendicular a los soportes. La carga se aplicó verticalmente mediante el rodillo central de carga sobre la cara lateral opuesta del prisma y se aumentó uniformemente hasta la rotura (Figura 5.15).



Fig. 5.15: Ensayo de resistencia a flexión

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenida la carga de rotura, se calculó la resistencia a flexión, R_f , en megapascales, mediante la siguiente fórmula:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

donde:

R_f : es la resistencia a flexión (MPa)

b: es el lado de la sección cuadrada del prisma (mm)

F_f : es la carga aplicada en la mitad del prisma en la rotura (N)

l : es la distancia entre soportes (mm)

Resistencia a compresión

Luego de haber realizado el ensayo de resistencia a flexión se obtuvieron dos semiprismas rotos, los cuales fueron ensayados a compresión cargando sus caras laterales.

Para llevar a cabo el ensayo a compresión fue necesario cambiar el dispositivo de la máquina, utilizado para el ensayo a flexión, por uno capaz de transmitir la carga de la máquina a las superficies de compresión de la probeta de mortero.

Una vez preparada la máquina se centró cada semiprisma lateralmente con relación a los platos a ± 0.5 mm, y longitudinalmente de manera que la base del prisma no sobresaliera de los platos o placas auxiliares más de unos 10 mm. Se aumentó la carga uniformemente a una velocidad de $(2\ 400+200)$ N/s durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura (Figura 5.16).



Fig. 5.16: Ensayo de resistencia a compresión

Fuente: Elaboración propia

Luego de ser obtenida la carga máxima de rotura se calculó la resistencia a compresión R_c (en megapascales) de la siguiente manera:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

donde:

R_c : es la resistencia a compresión (MPa)

F_f : es la carga máxima de rotura (N)

1600=40x40 mm, es la superficie de los platos o placas auxiliares (mm²)

5.1.5.3. Ensayos para la caracterización mineralógica

Para determinar las transformaciones mineralógicas que sufren los morteros con incorporación de vidrio una vez son sometidos al calentamiento, se realizó el análisis mineralógico de 3 muestras de mortero de cemento: una de mortero de cemento de referencia a temperatura ambiente (M1_MCR), una de mortero de cemento de referencia sometido a 800°C (M2_MCR_800) y una de mortero de cemento con 25% de sustitución del árido por vidrio triturado sometido a 800°C (M6_MC25_800); lo mismo se realizó con el mortero bastardo, siendo en este caso las muestras: una de mortero bastardo de referencia a temperatura ambiente (M9_MBR), una de mortero bastardo de referencia sometido a 800°C (M10_MBR_800) y una de mortero bastardo con 25% de sustitución del árido por vidrio triturado sometido a 800°C (M14_MB25_800).

Para preparar las muestras que se llevaron a laboratorio, se realizó la molienda fina primeramente mediante micro molino vibratorio (Figura 5.17) y se terminó de triturar de manera manual (Figura 5.18) hasta lograr pasar el total molido por el tamiz de 125 μ m (Figura 5.19). Las muestras preparadas para el ensayo se pueden observar en la Figura 5.20.



Fig. 5.17: Molienda fina en micro molino vibratorio.

Fuente: Elaboración propia



Fig. 5.18: Trituración de manera manual.

Fuente: Elaboración propia



Fig. 5.19: Tamiz utilizado para preparar las muestras.

Fuente: Elaboración propia



Fig. 5.20: Muestras preparadas para el análisis mineralógico.

Fuente: Elaboración propia

El análisis mineralógico de las muestras se ha realizado mediante difracción de rayos-X empleando un difractómetro marca Bruker-AXS modelo D8 Advance, determinando la mineralogía global mediante el método de polvo.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Caracterización mineralógica

En los difractogramas obtenidos tanto para los morteros de cemento como bastardos (Figuras 6.1 y 6.2) se puede observar una similitud en la variación que experimenta, al ser calentadas, la composición de las muestras de referencias y aquellas que sustituyen parte de la arena por vidrio triturado.

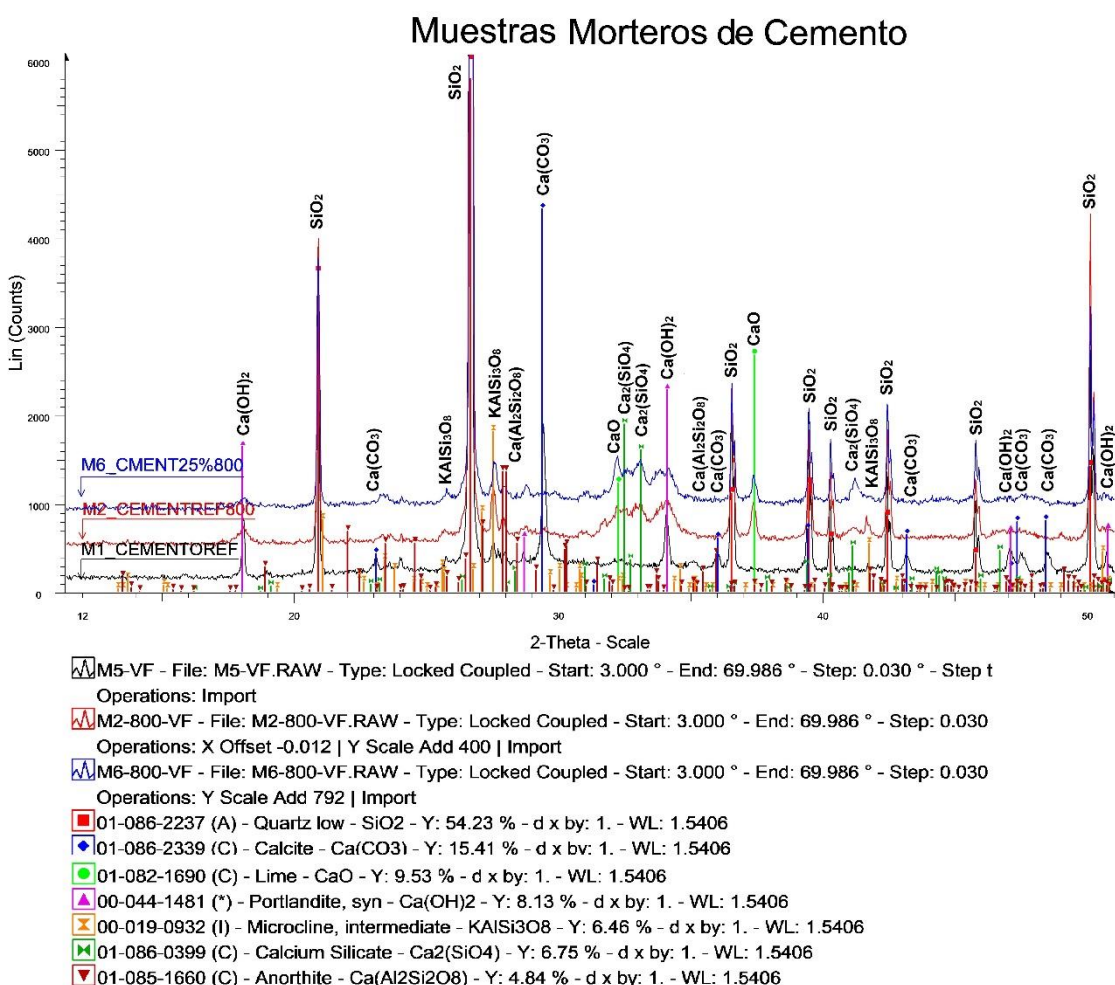


Fig. 6.1: Difractograma obtenido para muestras de mortero de cemento.

Fuente: Elaboración propia

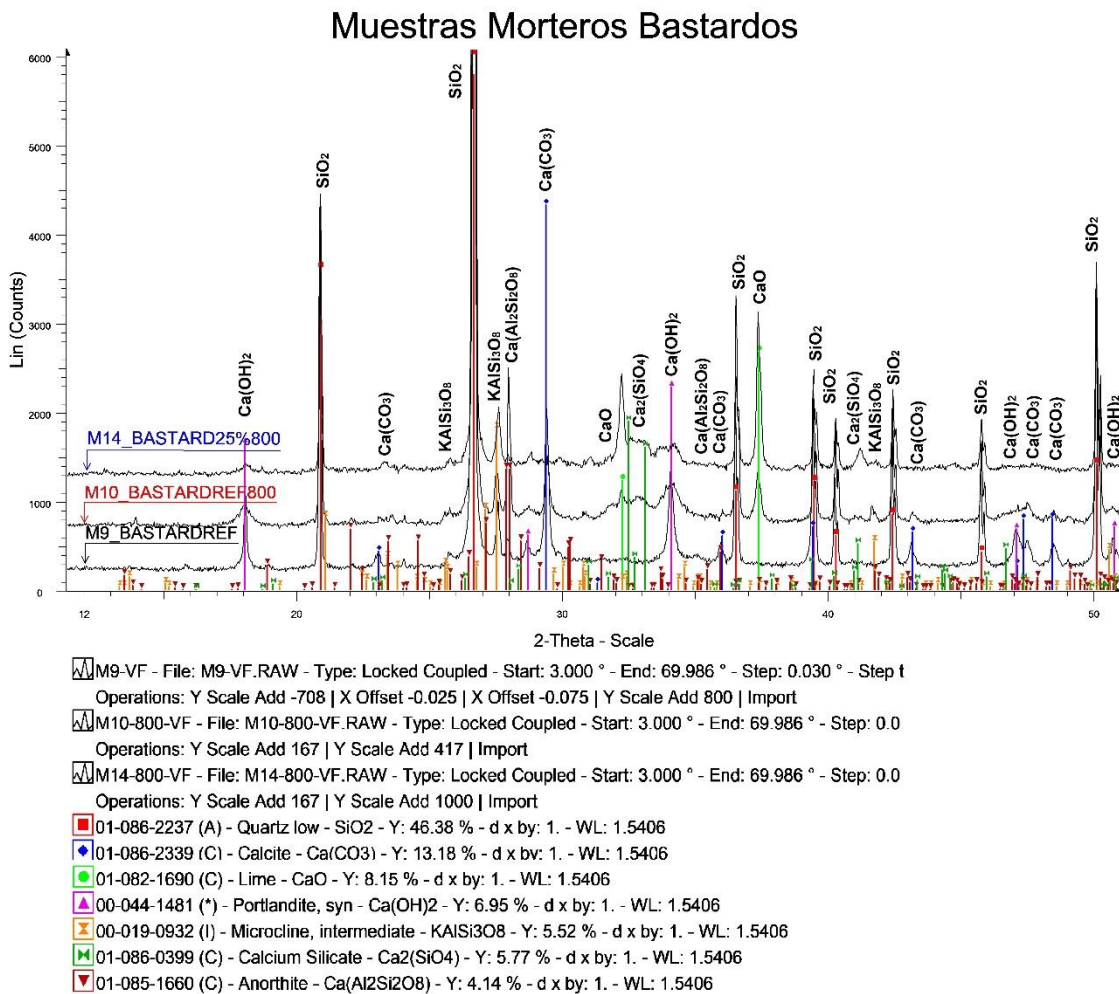


Fig. 6.2: Difractograma obtenido para muestras de mortero bastardo.

Fuente: Elaboración propia

En los difractogramas se aprecia la presencia de la portlandita (Ca(OH)_2) en los morteros de referencia a temperatura ambiente producto de la hidratación. También se observan picos que revelan la presencia de cuarzo (SiO_2), feldespatos como la microclina (KAlSi_3O_8) y anortita ($\text{Ca(Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$), los cuales tienen su origen en la arena utilizada en la fabricación de los morteros. La calcita ($\text{Ca(CO}_3)$) que forma los picos en las muestras de mortero a los 28 días de curado debe su origen a la portlandita carbonatada del cemento o en la posible fracción carbonatada del árido.

Con el calentamiento a 800°C , la portlandita se transforma en óxido de calcio (CaO) con la evaporación del agua debido a la carbonatación y la calcita se descompone en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2), coincidiendo con resultados de otras investigaciones (Stepkowska et al., 2004).

Además, se observa la formación de silicato cálcico ($\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$) producto a la calcinación a altas temperaturas del óxido de calcio (CaO) con el dióxido de sílice (SiO_2).

De la comparación de los dos difractogramas, de los morteros de cemento y bastardos, se puede apreciar que el comportamiento de los picos que evidencian la presencia de los componentes en cada una de sus fases no muestra diferencias considerables, sólo se observan picos un poco más pronunciados para el óxido de calcio (CaO) en los morteros bastardos, lo cual se debe a la incorporación de la cal.

6.2. Resultados de ensayos no destructivos

6.2.1. Propiedades físicas

De los ensayos físicos se obtuvieron los pesos secos, saturados y saturados sumergidos (Tabla B.1 del Anexo B) y posteriormente se determinó la densidad aparente (D_a) y la porosidad abierta (P_a) (Tabla B.2 del Anexo B). Como se había explicado anteriormente al saturar las muestras después de ser sometidas al calentamiento, varias de ellas se desintegraron completamente, sin poder determinarse estas propiedades. Las muestras deshechas fueron: una de las probetas correspondiente a los morteros de cemento de referencia, todas las de los morteros bastardos de referencia y cuatro de las muestras de los morteros bastardos con 25% de sustitución de arena por vidrio triturado. Después de determinar la media y la desviación típica por tipo de mortero de las muestras ensayadas, a temperatura ambiente y después del calentamiento, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Estadísticos descriptivos de la Densidad Aparente (D_a) y Porosidad Abierta (P_a) por tipo de mortero

Tipo de mortero	Curado 28 días					Calentamiento 800° C				
	n	Densidad (g/cm^3)		Porosidad abierta (%)		n	Densidad (g/cm^3)		Porosidad abierta (%)	
		Media	Des. típica	Media	Des. típica		Media	Des. típica	Media	Des. típica
MCR	6	2.09	0.00894	19.83	0.54763	5	1.78	0.05070	33.95	1.74231
MC25	6	2.01	0.00983	21.65	0.33096	6	1.76	0.06186	34.08	1.58312
MBR	6	1.94	0.02422	24.92	1.32994					
MB25	6	1.92	0.01329	24.83	0.34661	2	1.61	0.02121	37.65	1.52735

Fuente: *Elaboración propia*

Como se puede observar en las Figuras 6.3 y 6.4, en el mortero de cemento ensayado tras 28 días de curado, la densidad aparente disminuye con la incorporación de vidrio triturado como sustitución de la arena (de 2.09 g/cm³ a 2.01 g/cm³), mientras que la porosidad abierta aumenta (de 19.83% a 21.65%). De la misma manera ocurre con estas propiedades tras el calentamiento a 800°C, siendo la densidad aparente ligeramente menor (de 1.79 g/cm³ a 1.76 g/cm³) y la porosidad abierta ligeramente mayor (de 33.95% a 34.08%) en el mortero con incorporación de vidrio con respecto al de referencia.

En el caso del mortero bastardo curado 28 días, tanto la densidad aparente como la porosidad abierta disminuyen ligeramente con la sustitución de parte de la arena por vidrio triturado (de 1.94 g/cm³ a 1.92 g/cm³ y de 24.92% a 24.83% respectivamente).

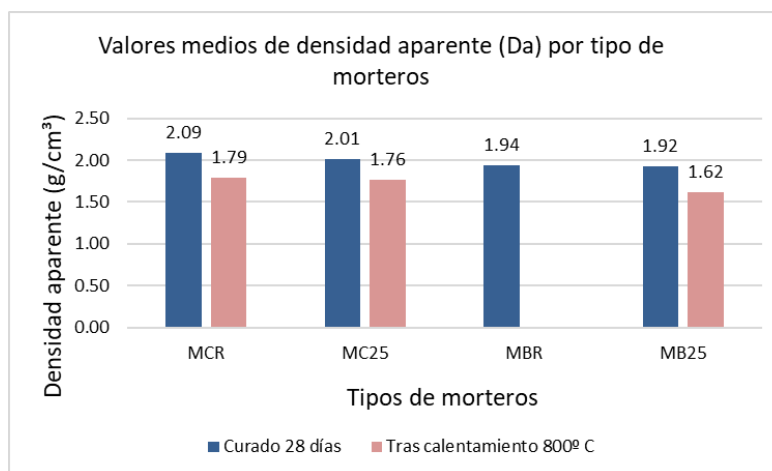


Fig. 6.3: Densidad aparente (Da) tras el curado y después del calentamiento.

Fuente: Elaboración propia

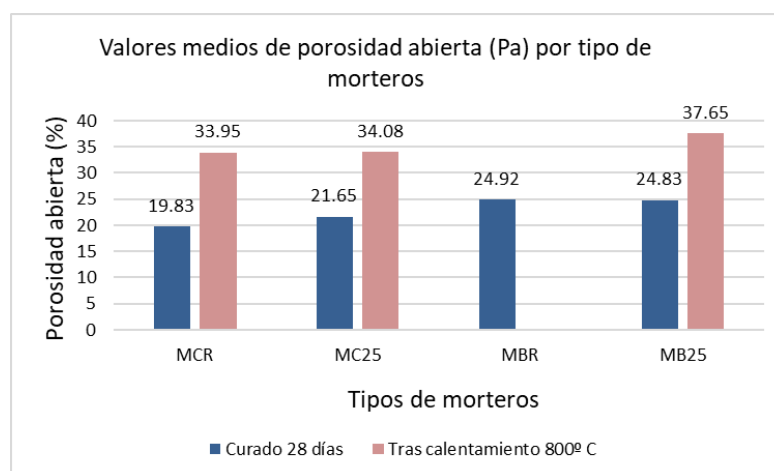


Fig. 6.4: Porosidad abierta (Pa) tras el curado y después del calentamiento.

Fuente: Elaboración propia

Para poder saber si estas variaciones son estadísticamente significativas, se utilizó la prueba t de Student, la cual es un modelo de la estadística inferencial válido para distribuciones normales con tamaño de muestras pequeñas. La determinación de la normalidad de las distribuciones se verificó empleando la prueba de Shapiro-Wilk. Para aquellas distribuciones no normales de muestras independientes se empleó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, que asigna a cada uno de los valores de las dos muestra su rango (posición relativa de cada observación dentro de la muestra), y a partir de dichos rangos calcula el estadístico "U". Análogamente, para aquellas distribuciones no normales de muestras relacionadas se empleó la prueba no paramétrica de rangos con signo Wilcoxon. Para todas las pruebas se estableció un nivel de significación de $\alpha=0.01$ (Walpole et al., 2012; Nieves et al., 2010). Para este análisis se empleó el software estadístico SPSS V27.0.

La prueba estadística consistió en realizar un contraste de hipótesis para comparar las medias. Las hipótesis planteadas fueron las siguientes:

H_0 : la media μ (de Da o Pa, según el caso) del mortero de referencia (MCR o MBR) es igual a la media μ del mortero con incorporación de vidrio como sustitución del árido (MC25 o MB25).

H_1 : la media μ (de Da o Pa, según el caso) del mortero de referencia (MCR o MBR) es diferente a la media μ del mortero con incorporación de vidrio como sustitución del árido (MC25 o MB25).

Los grados de libertad se calcularon como $(n_{MCR}-1) + (n_{MC25}-1)$ o $(n_{MBR}-1) + (n_{MB25}-1)$, según el caso analizado.

Donde:

n_{MCR} : es el número de muestras de MCR

n_{MC25} : es el número de muestras de MC25

n_{MBR} : es el número de muestras de MBR

n_{MB25} : es el número de muestras de MB25

A partir de la determinación del valor de la t de Student o la U de Mann-Whitney para los casos donde no se cumplió la normalidad, y los grados de libertad, se pudo obtener la probabilidad de que H_0 sea cierta (p-valor), tomando como parámetro de aceptación de H_0 , $p\text{-valor} \geq \alpha$.

En la Tabla 6.2 se muestran los resultados obtenidos del análisis realizado para cada uno de los casos.

Tabla 6.2: Resultados del contraste de hipótesis para las propiedades físicas

Hipótesis	Curado 28 días					Calentamiento 800° C				
	g.l	Densidad aparente		Porosidad abierta		g.l	Densidad aparente		Porosidad abierta	
		t	p-valor	t	p-valor		t	p-valor	t	p-valor
$\mu_{MCR} = \mu_{MC25}$ $\mu_{MCR} \neq \mu_{MC25}$	10	14.436	.000	-6.980	.000	9	0.713	.494	0.127	.901
$\mu_{MBR} = \mu_{MB25}$ $\mu_{MBR} \neq \mu_{MB25}$	10	1.625	.135	U=10.0*	.200					

*Al no seguir la muestra la distribución normal se emplea la prueba U de Mann-Whitney

Fuente: *Elaboración propia*

Siendo $\alpha=0.01$, de los resultados anteriores se pudo concluir que la incorporación de vidrio triturado como sustituto del árido en un 25% en morteros de cemento con 28 días de curado conducen a variaciones estadísticamente significativas tanto en la densidad aparente (disminución) como en la porosidad abierta (incremento), mientras que en el resto de los casos analizados las variaciones observadas no resultaron significativas.

6.2.2. Velocidad de ultrasonido

A partir de los ensayos de ultrasonido se obtuvo la velocidad de transmisión de la onda ultrasónica en los tres ejes de las probetas. A continuación, en las Tablas 6.3a y 6.3b se muestran los estadísticos descriptivos calculados a partir de los resultados obtenidos por cada tipo de mortero, antes y después del calentamiento a 800°C.

Tabla 6.3a: Estadísticos de velocidades de ultrasonido a temperatura ambiente, por tipo de mortero y por eje

	Tipo de mortero	Eje X			Eje Y			Eje Z		
		n	Media	Des. típica	n	Media	Des. típica	n	Media	Des. típica
Curado 28 días	MCR	12	3 462.83	152.539	6	3 773.17	161.748	12	3 304.58	195.040
	MC25	12	3 517.58	124.620	6	3 655.67	84.871	12	3 360.17	102.033
	MBR	12	2 870.33	83.923	6	2 959.50	99.178	12	2 627.33	114.366
	MB25	12	2 847.58	88.236	6	2 882.67	30.566	12	2 590.25	67.393

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 6.3b: Estadísticos de velocidades de ultrasonido después del calentamiento, por tipo de mortero y por eje

	Tipo de mortero	Eje X			Eje Y			Eje Z		
		n	Media	Des. típica	n	Media	Des. típica	n	Media	Des. típica
Calentamiento 800°C	MCR	12	1 082.75	76.238	6	1 014.33	31.322	12	1 056.92	48.855
	MC25	12	1 080.33	59.916	6	974.00	29.107	12	1 024.00	40.104
	MBR	12	497.50	80.474	6	423.67	78.962	12	534.42	155.964
	MB25	12	578.25	36.661	6	526.17	178.160	12	538.08	43.473

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en las Figuras 6.5, 6.6 y 6.7 se produce una disminución de la velocidad de transmisión de ultrasonido en todos los tipos de morteros después del calentamiento.

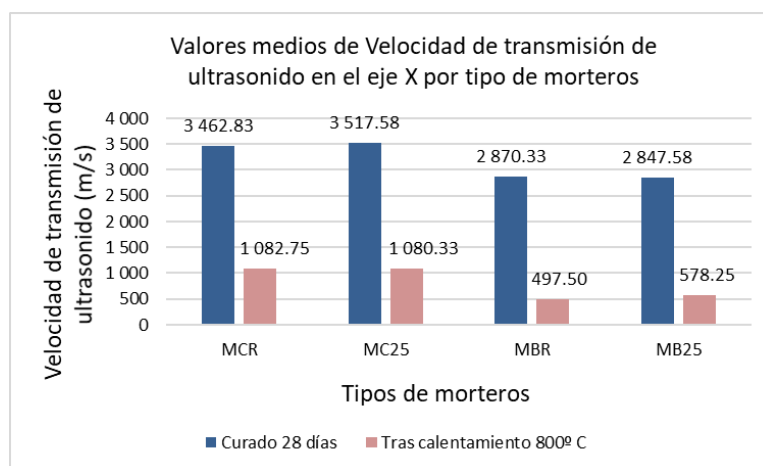


Fig. 6.5: Velocidad de transmisión de ultrasonido en el eje X

Fuente: Elaboración propia

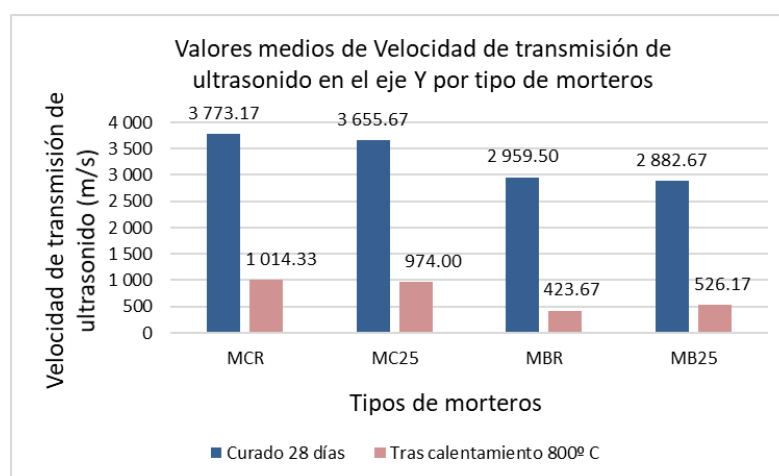


Fig. 6.6: Velocidad de transmisión de ultrasonido en el eje Y

Fuente: Elaboración propia

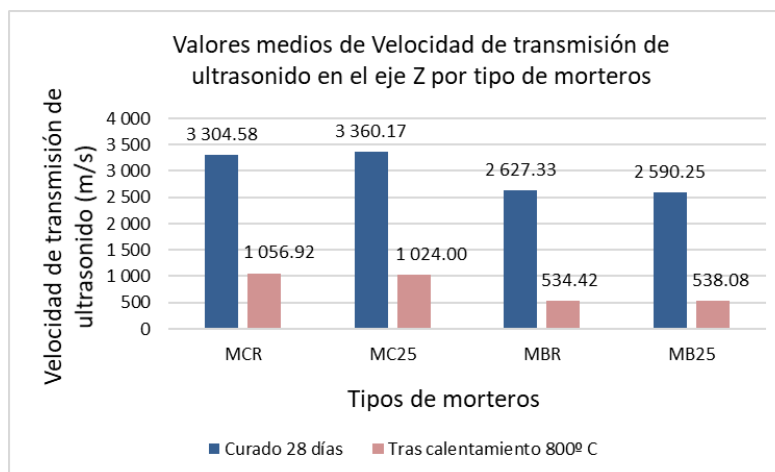


Fig. 6.7: Velocidad de transmisión de ultrasonido en el eje Z

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en el mortero de cemento ensayado tras 28 días de curado, la velocidad de ultrasonido aumentó ligeramente con la incorporación de vidrio triturado como sustitución de la arena, tanto en el eje X (de 3 462.83 m/s a 3 517.58 m/s) como en el eje Z (de 3 304.58 m/s a 3 360.17 m/s), mientras que en el eje Y disminuye (de 3 773.17 m/s a 3 655.67 m/s); sin embargo tras el calentamiento en los morteros con incorporación de vidrio triturado se aprecia una ligera disminución de los valores con respecto a los morteros de referencia en los tres ejes analizados.

En el caso del mortero bastardo curado 28 días, la velocidad de transmisión de ultrasonido disminuye ligeramente en todos los ejes con la sustitución de parte de la arena por vidrio triturado, mientras que tras el calentamiento ocurre lo contrario siendo mayores los valores en las muestras que incorporan el vidrio en su composición.

Además, se puede observar un peor comportamiento de los morteros bastardos (MBR y MB25) en comparación con los morteros de cemento (MCR y MC25), tanto después de 28 días de curado como después del calentamiento.

Nuevamente, se estudió si las variaciones descritas anteriormente en las velocidades de ultrasonido son estadísticamente significativas.

Se realizaron tres tipos de pruebas de hipótesis: variación de la velocidad de transmisión de ultrasonido del mortero curado 28 días al ser sometido a 800°C, variación de la velocidad de ultrasonido entre el mortero de referencia y mortero con 25% de vidrio, y entre el mortero de cemento y mortero bastardo.

Por tanto, las tres pruebas de hipótesis fueron las siguientes:

1) H_0 : la media μ de la velocidad de ultrasonido (eje x, eje y, eje z) de los mortero con 28 días de curado es igual a la media μ del mortero sometido al calentamiento después del curado.

H_1 : la media μ de la velocidad de ultrasonido (eje x, eje y, eje z) de los mortero con 28 días de curado es diferente a la media μ del mortero sometido al calentamiento después del curado.

2) H_0 : la media μ de la velocidad de ultrasonido (eje x, eje y, eje z) del mortero de referencia (MCR o MBR) es igual a la media μ del mortero con incorporación de vidrio como sustitución del árido (MC25 o MB25).

H_1 : la media μ de la velocidad de ultrasonido (eje x, eje y, eje z) del mortero de referencia (MCR o MBR) es diferente a la media μ del mortero con incorporación de vidrio como sustitución del árido (MC25 o MB25).

3) H_0 : la media μ de la velocidad de ultrasonido (eje x, eje y, eje z) de los morteros de cemento (MCR y MC25) es igual a la media μ de los morteros bastardos (MBR y MB25).

H_1 : la media μ de la velocidad de ultrasonido (eje x, eje y, eje z) de los morteros de cemento (MCR y MC25) es diferente a la media μ de los morteros bastardos (MBR y MB25).

Los grados de libertad para el primer contraste se determinaron como $(n_{MCR}-1)$, $(n_{MC25}-1)$, $(n_{MBR}-1)$ o $(n_{MB25}-1)$ según el caso, ya que se trata de la mismas muestras ensayadas a diferentes condiciones.

Para el segundo contraste, al tratarse de comparaciones entre diferentes grupos de muestras, los grados de libertad se determinaron como $(n_{MCR}-1) + (n_{MC25}-1)$ o $(n_{MBR}-1) + (n_{MB25}-1)$, según el caso analizado.

En el tercer contraste al igual que en el segundo se tratan de grupos de muestras diferentes que se comparan, por lo que los grados de libertad se calcularon como $(n_{MCR}-1) + (n_{MBR}-1)$ o $(n_{MC25}-1) + (n_{MB25}-1)$, según el caso.

El parámetro de aceptación de H_0 fue el mismo que en el análisis de las propiedades anteriores, $p\text{-valor} \geq \alpha$ (0.01).

En la Tabla 6.4 se muestran los resultados obtenidos para el primer tipo de prueba de hipótesis.

Tabla 6.4: Resultados del primer contraste de hipótesis para las velocidades de ultrasonido

Hipótesis	Eje X			Eje Y			Eje Z		
	g.l	t	p-valor	g.l	t	p-valor	g.l	t	p-valor
$\mu_{MCR_{28}} = \mu_{MCR_{800}}$ $\mu_{MCR_{28}} \neq \mu_{MCR_{800}}$	11	42.333	.000	5	40.129	.000	11	37.320	.000
$\mu_{MC25_{28}} = \mu_{MC25_{800}}$ $\mu_{MC25_{28}} \neq \mu_{MC25_{800}}$	11	66.335	.000	5	105.467	.000	11	68.192	.000
$\mu_{MBR_{28}} = \mu_{MBR_{800}}$ $\mu_{MBR_{28}} \neq \mu_{MBR_{800}}$	11	61.870	.000	5	47.139	.000	11	Z=-3.059*	.002
$\mu_{MB25_{28}} = \mu_{MB25_{800}}$ $\mu_{MB25_{28}} \neq \mu_{MB25_{800}}$	11	88.637	.000	5	Z=-2.201*	.028	11	105.703	.000

*Al no seguir la muestra relacionada la distribución normal se emplea la prueba de Wilcoxon

Fuente: Elaboración propia

De los resultados anteriores se puede concluir que las variaciones (disminución) producidas en las velocidades de transmisión de ultrasonido, tanto de los morteros de cemento como bastardos, al someterse a 800°C, son en todos los casos estadísticamente significativas, con excepción del mortero bastardo con incorporación de vidrio triturado, donde las diferencias no fueron considerables.

Para el segundo contraste de hipótesis, los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5: Resultados del segundo contraste de hipótesis para las velocidades de ultrasonido

	Hipótesis	Eje X			Eje Y			Eje Z		
		g.l	t	p-valor	g.l	t	p-valor	g.l	t	p-valor
Curado 28 días	$\mu_{MCR} = \mu_{MC25}$ $\mu_{MCR} \neq \mu_{MC25}$	22	-0.963	.346	10	1.576	.146	22	-0.875	.391
	$\mu_{MBR} = \mu_{MB25}$ $\mu_{MBR} \neq \mu_{MB25}$	22	0.086	.932	10	2.311	.043	22	1.804	.085
Calentamiento 800°C	$\mu_{MCR} = \mu_{MC25}$ $\mu_{MCR} \neq \mu_{MC25}$	22	0.647	.524	10	1.813	.100	22	0.968	.344
	$\mu_{MBR} = \mu_{MB25}$ $\mu_{MBR} \neq \mu_{MB25}$	22	-3.163	.005	10	U=8.0*	.109	22	U=37.5*	.046

*Al no seguir la muestra relacionada la distribución normal se emplea la prueba U de Mann-Whitney

Fuente: Elaboración propia

Al ser en todos los casos el p-valor superior al nivel de significación ($\alpha=0.01$), se pudo llegar a la conclusión de que la incorporación de vidrio triturado como sustituto del árido en un 25%, tanto en morteros de cemento como bastardos, no conduce a variaciones estadísticamente significativas en las velocidades de transmisión de ultrasonido, a los 28 días de curado ni después del calentamiento a 800°C; excepto en el caso de la comparación entre la velocidad de ultrasonido en el eje X del mortero bastardo de referencia y el mortero bastardo con incorporación de vidrio triturado, calentados a 800°C (aumento).

En la Tabla 6.6 se muestran los resultados obtenidos para el tercer contraste de hipótesis.

Tabla 6.6: Resultados del tercer contraste de hipótesis para las velocidades de ultrasonido

	Hipótesis	Eje X			Eje Y			Eje Z		
		g.l	t	p-valor	g.l	t	p-valor	g.l	t	p-valor
Curado 28 días	$\mu_{MCR} = \mu_{MBR}$ $\mu_{MCR} \neq \mu_{MBR}$	22	11.789	.000	10	10.505	.000	22	10.376	.000
	$\mu_{MC25} = \mu_{MB25}$ $\mu_{MC25} \neq \mu_{MB25}$	22	15.200	.000	10	20.990	.000	22	21.811	.000
Calentamiento 800°C	$\mu_{MCR} = \mu_{MBR}$ $\mu_{MCR} \neq \mu_{MBR}$	22	18.289	.000	10	17.032	.000	22	U=1.0*	.000
	$\mu_{MC25} = \mu_{MB25}$ $\mu_{MC25} \neq \mu_{MB25}$	22	24.761	.000	10	U=0.0*	.004	22	28.459	.000

*Al no seguir la muestra relacionada la distribución normal se emplea la prueba U de Mann-Whitney

Fuente: Elaboración propia

De los anteriores resultados se puede observar como las diferencias entre las velocidades de ultrasonidos de los morteros de cemento y morteros bastardos (menor en morteros bastardos), son estadísticamente significativas en todos los casos, tanto con 28 días de curado como después del calentamiento.

6.3. Resultados de ensayos destructivos

6.3.1. Propiedades mecánicas

A partir de los ensayos mecánicos de flexión y compresión se obtuvieron las cargas de rotura (Tabla C.1 del Anexo C) y posteriormente se determinó la resistencia a flexión (R_f) y la resistencia a compresión (R_c). Las resistencias

mecánicas se pudieron obtener en todas las probetas elaboradas para ser ensayadas a los 28 días de curado (6 probetas por cada tipo de mortero); sin embargo, como se explicó en el capítulo anterior, después del calentamiento las probetas hidratadas se desintegraron por lo que no pudieron ser ensayadas, obteniéndose las propiedades mecánicas solamente en 3 probetas de cada tipo de mortero después de someterlas a 800°C. Una vez determinadas las medias y desviaciones típicas de las muestras ensayadas, a temperatura ambiente y después del calentamiento, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7: Estadísticos de propiedades mecánicas por tipo de mortero

	Tipo de mortero	Resistencia a flexión (N/mm ²)			Resistencia a compresión (N/mm ²)		
		n	Media	Des. típica	n	Media	Des. típica
Curado 28 días	MCR	6	5.79	0.28459	12	33.33	2.19188
	MC25	6	4.59	0.29978	12	27.39	2.21324
	MBR	6	1.26	0.67531	12	8.84	1.70256
	MB25	6	1.44	0.58366	12	9.78	0.99433
Calentamiento 800°C	MCR	3	0.49	0.11618	6	5.26	0.95341
	MC25	3	0.35	0.12239	6	2.68	0.21775
	MBR	3	0.18	0.27569	6	1.15	0.15867
	MB25	3	0.09	0.23828	6	0.69	0.13576

Fuente: *Elaboración propia*

En las Figuras 6.8 y 6.9 se puede observar cómo, en el mortero de cemento ensayado tras 28 días de curado, tanto la resistencia a flexión como a compresión disminuyeron con la incorporación de vidrio triturado como sustitución de la arena (de 5.80 N/mm² a 4.60 N/mm² y de 33.33 N/mm² a 27.39 N/mm² respectivamente). De forma contraria ocurre con el mortero bastardo curado 28 días, donde tanto la resistencia a flexión como a compresión aumentan en el mortero con incorporación de vidrio con respecto al de referencia (de 1.26 N/mm² a 1.44 N/mm² y de 8.84 N/mm² a 9.78 N/mm² respectivamente). Este resultado nos indica que, ante la sustitución de la arena por vidrio triturado, el mortero bastardo se comporta mejor que el mortero de cemento, al mejorar las propiedades mecánicas del mismo.

Sin embargo, tras el calentamiento, las dos propiedades mecánicas analizadas se ven afectadas con una disminución en sus resultados, tanto en los morteros de cemento como bastardos que tienen incorporado vidrio triturado en su composición.

Por otra parte, de la comparación de las propiedades en un mismo tipo de mortero (con o sin incorporación de vidrio triturado), antes y después de someterse a 800°C, se puede observar que en todos los casos se produce una disminución.

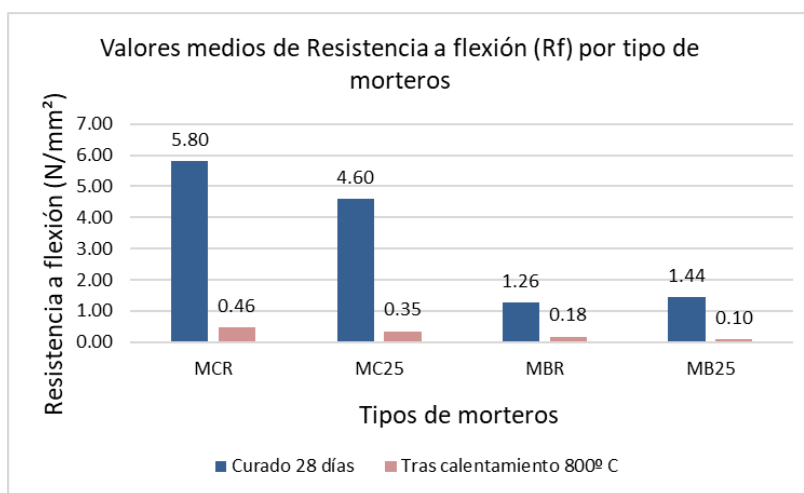


Fig. 6.8: Resistencia a flexión (R_f) por tipos de morteros tras el curado y después del calentamiento

Fuente: Elaboración propia

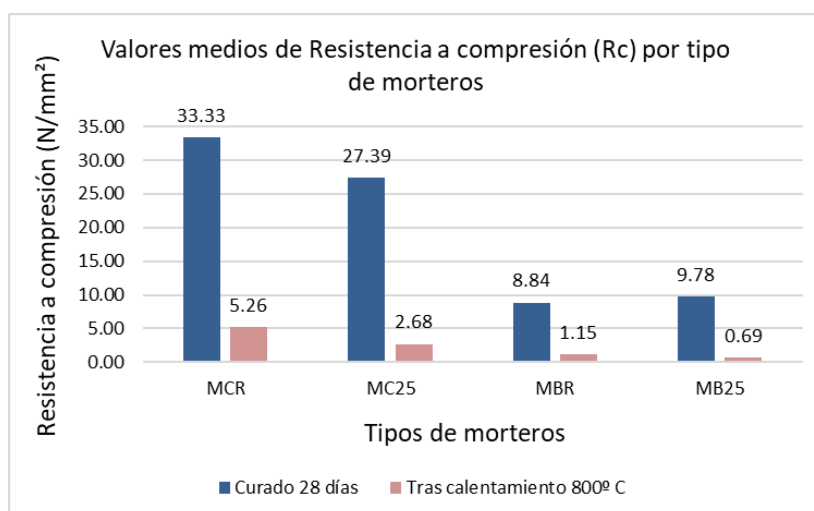


Fig. 6.9: Resistencia a compresión (R_c) por tipos de morteros tras el curado y después del calentamiento

Fuente: Elaboración propia

De igual manera que para las propiedades que se han analizado anteriormente, se chequeó si estas variaciones son estadísticamente significativas y se estableció un nivel de significación de $\alpha=0.01$.

Las pruebas de hipótesis estuvieron encaminado a la validación desde el punto de vista estadístico de los dos tipos de comparaciones que fueron realizadas anteriormente: diferencias en las propiedades mecánicas entre morteros de referencia y morteros con incorporación de vidrio triturado, tanto a 28 días de curado como tras el calentamiento y diferencias en las propiedades mecánicas entre morteros con 28 días de curado y los ensayados después del calentamiento.

Por consiguiente, los dos contrastes de hipótesis fueron las siguientes:

1) H_0 : la media μ (de R_f o R_c , según el caso) del mortero de referencia (MCR o MBR) es igual a la media μ del mortero con incorporación de vidrio como sustitución del árido (MC25 o MB25).

H_1 : la media μ (de R_f o R_c , según el caso) del mortero de referencia (MCR o MBR) es diferente a la media μ del mortero con incorporación de vidrio como sustitución del árido (MC25 o MB25).

2) H_0 : la media μ (de R_f o R_c , según el caso) de los mortero con 28 días de curado es igual a la media μ del mortero sometido al calentamiento después del curado.

H_1 : la media μ (de R_f o R_c , según el caso) de los mortero con 28 días de curado es diferente a la media μ del mortero sometido al calentamiento después del curado.

Se determinaron los grados de libertad de la misma manera que en las propiedades anteriores: para el primer contraste, $(n_{MCR}-1) + (n_{MC25}-1)$ o $(n_{MBR}-1) + (n_{MB25}-1)$ y para el segundo, $(n_{MCR_{28}}-1) + (n_{MCR_{800}}-1)$, $(n_{MC25_{28}}-1) + (n_{MC25_{800}}-1)$, $(n_{MBR_{28}}-1) + (n_{MBR_{800}}-1)$ o $(n_{MB25_{28}}-1) + (n_{MB25_{800}}-1)$.

El parámetro de aceptación se asumió igual que para el análisis de la propiedad físicas.

En la Tabla 6.8 se muestran los resultados obtenidos para el primer contraste de hipótesis.

Tabla 6.8: Resultados del primer contraste de hipótesis para las propiedades mecánicas.

Hipótesis	Curado 28 días						Calentamiento 800° C					
	g.l	Resistencia a flexión		g.l	Resistencia a compresión		g.l	Resistencia a flexión		g.l	Resistencia a compresión	
		t	p-valor		t	p-valor		t	p-valor		t	p-valor
$\mu_{MCR} = \mu_{MC25}$ $\mu_{MCR} \neq \mu_{MC25}$	10	7.111	.000	22	6.611	.000	4	1.447	.211	10	6.454	.000
$\mu_{MBR} = \mu_{MB25}$ $\mu_{MBR} \neq \mu_{MB25}$	10	U=11.0*	.262	22	-1.647	.114	4	U=0.0*	.043	10	5.435	.000

*Al no seguir la muestra la distribución normal se emplea la prueba U de Mann-Whitney

Fuente: *Elaboración propia*

De la comparación del p-valor con el nivel de significación ($\alpha=0.01$), se pudo concluir que la incorporación de vidrio triturado como sustituto del árido en un 25% en morteros de cemento con 28 días de curado, conduce a variaciones estadísticamente significativas tanto en la resistencia a flexión (disminución) como a compresión (disminución), no ocurriendo lo mismo en los morteros bastardos. Para los morteros que fueron sometidos al calentamiento, la incorporación de vidrio produjo diferencias significativas en la resistencia a compresión (disminución) tanto de los morteros cemento como bastardos, no siendo así para la resistencia a flexión.

La invariabilidad de las propiedades mecánicas en los morteros bastardos con 28 días de curado al incorporar un 25% de vidrio triturado en su composición validan los resultados obtenidos en las otras propiedades (propiedades físicas y velocidades de ultrasonido), donde tampoco se detectaron diferencias significativas.

Para el segundo contraste de hipótesis se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 6.9.

De los resultados de la Tabla 6.9 se puede llegar a la conclusión de que las variaciones (disminución) producidas en las propiedades mecánicas de los morteros de cemento, al someterse a 800°C, son en todos los casos estadísticamente significativas, correspondiéndose con la disminución de la densidad y el aumento de la porosidad.

Tabla 6.9: Resultados del segundo contraste de hipótesis para las propiedades mecánicas

Hipótesis	Resistencia a flexión			Resistencia a compresión		
	g.l	t	p-valor	g.l	t	p-valor
$\mu_{MCR_{28}} = \mu_{MCR_{800}}$ $\mu_{MCR_{28}} \neq \mu_{MCR_{800}}$	7	30.031	.000	16	29.648	.000
$\mu_{MC25_{28}} = \mu_{MC25_{800}}$ $\mu_{MC25_{28}} \neq \mu_{MC25_{800}}$	7	23.204	.000	16	26.868	.000
$\mu_{MBR_{28}} = \mu_{MBR_{800}}$ $\mu_{MBR_{28}} \neq \mu_{MBR_{800}}$	7	U=0.0*	.020	16	10.876	.000
$\mu_{MB25_{28}} = \mu_{MB25_{800}}$ $\mu_{MB25_{28}} \neq \mu_{MB25_{800}}$	7	U=0.0*	.020	16	21.964	.000

*Al no seguir la muestra la distribución normal se emplea la prueba U de Mann-Whitney

Fuente: Elaboración propia

En los morteros bastardos sólo se puede considerar significativas las diferencias que se producen en la resistencia a compresión (disminución) después del calentamiento.

7. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos de los ensayos realizados durante el proceso experimental, se plantean las siguientes conclusiones como respuesta a los objetivos de la investigación:

- De la caracterización mineralógica se observó que las transformaciones que ocurren en la composición de los minerales de los morteros de referencia y los que incorporan vidrio triturado son similares al someterlos al calentamiento a 800°C. Las principales variaciones en la composición de los morteros con el calentamiento se deben a el proceso de carbonatación de los principales componentes del cemento.
- De los resultados de las propiedades físicas (densidad y porosidad) se determinó que:
 - en el mortero de cemento con 28 días de curado hay una modificación significativa de estas propiedades al sustituir el 25% del árido por vidrio triturado, aumentando la porosidad y disminuyendo la densidad.
 - en el mortero de cemento sometido a 800°C no hay diferencias significativas de estas propiedades entre el mortero de referencia y el mortero con 25% de sustitución de árido por vidrio triturado.
 - en el mortero bastardo con 28 días de curado, la sustitución del 25% de árido por vidrio triturado no modifica las propiedades físicas.
- De manera general, al sustituir un 25% del árido por vidrio reciclado, la velocidad de transmisión de los ultrasonidos no se ve afectada significativamente en el mortero de cemento ni en el mortero bastardo.
- De la comparación de las propiedades mecánicas en los diferentes tipos de morteros se pudo concluir que:
 - en el mortero de cemento con 28 días de curado, la incorporación de vidrio triturado como sustituto del árido en un 25% produce una modificación significativa de estas propiedades, disminuyendo tanto la flexión como la compresión.
 - en el mortero de cemento sometido a 800°C, la incorporación de vidrio produjo diferencias significativas en la resistencia a

compresión, disminuyendo esta propiedad, mientras que la resistencia a flexión no se modificó sustancialmente.

- en el mortero bastardo con 28 días de curado, la sustitución del 25% del árido por vidrio triturado no varía de manera significativa las propiedades mecánicas.
- en el mortero bastardo sometido a 800°C, la incorporación en un 25% de vidrio triturado como sustitución del árido produjo una variación significativa, disminuyendo la resistencia a compresión, mientras que en la resistencia a flexión no se obtuvieron diferencias significativas.

En resumen, la sustitución de un 25% del árido por vidrio triturado proveniente del reciclado no produce variaciones en las propiedades del mortero bastardo a temperatura ambiente, teniendo este tipo de mortero un mejor comportamiento que el mortero de cemento.

8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de los resultados y hallazgos de este estudio y de las conclusiones planteadas, se considera fundamental el futuro desarrollo de las siguientes líneas de investigación:

- Evaluar la influencia de la incorporación de otros porcentajes de sustitución del árido por vidrio triturado en las propiedades de los morteros bastardos.
- Repetir el estudio realizado empleando los cementos utilizados en investigaciones precedentes (CEM I 42.5R y CEM IV/B (V) 32.5N), de manera que:
 - se pueda evaluar si el comportamiento de los morteros bastardos al incorporar el vidrio como sustitución de la arena conduce a resultados similares a los obtenidos en esta investigación.
 - sea posible la realización de todos los ensayos planificados, lo cual, producto a la utilización de un cemento con alto contenido de caliza, se vio afectada en esta investigación en el caso de algunas muestras, debido a su desintegración por la fuerte reacción álcali-sílice al ser hidratadas.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alducin Ochoa, J. M., Martín-del-Río, J. J., Torres González, M., Flores Alés, V., & Hernández Cruz, D. (2021). *Performance of mortars based on recycled glass as aggregate by accelerated decay tests (ADT)*. *Construction and Building Materials*, 300, 124057. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124057>.
- Alejandro Sánchez, F. J. (2002). *Historia, caracterización y restauración de morteros*. Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, Sevilla, 50-51.
- Alvarez, J. I., Martín, A., & García Casado, P. J. (1995). *Historia de los morteros*. PH. Boletín Del Instituto Andaluz Del Patrimonio Histórico, 3(13), 52–59. <https://www.researchgate.net/publication/273110688>.
- Ashurst, J. (1983). *Mortars, Plasters and Renders in Conservation / John Ashurst*. London: Ecclesiastical Architects' and Surveyors' Association. Print. https://discovered.ed.ac.uk/permalink/44UOE_INST/iatqhp/alma9918376143502466.
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (1996). *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas* (UNE-EN 933-2:1996).
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total* (UNE-EN 1936:2007).
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2012). *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado* (UNE-EN 933-1:2012).
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2018). *Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería* (UNE-EN 998-2:2018).
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2018). *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias* (UNE-EN 196-1:2018).
- Bajad, M. N., Modhera, C. D., & Desai, A. K. (2011). *Effect of glass on strength of concrete subjected to sulphate attack*. *International Journal of Civil Engineering*

- Research and Development (IJCERD), 1(2), 1–13.
<https://ssrn.com/abstract=3501397>.
- Cabrera Covarrubias, F. G., Gomez Soberon, J. M., Almaral Sanchez, J. L., Arredondo Rea, S. P., & Mendivil Escalante, J. M. (2018). *Mechanical and Basic Deformation Properties of Mortar with Recycled Glass as a Fine Aggregate Replacement*. *International Journal of Civil Engineering*, 16(1), 107–121.
<https://doi.org/10.1007/s40999-016-0071-9>.
- Canal Materiales de Construcción (2019). *Morteros. Lección 1: Generalidades y Conceptos*. [Archivo de Vídeo] Youtube. <https://youtu.be/IQvURlyG1iY>.
- Carvajal Romero, H., García Álvarez, M. T., & Teijeiro Álvarez, M. (2021). *Evolución de la política medioambiental en la gestión de residuos*. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(2), 265-275.
- Chinchón Yepes, J. S. (s.f.). *Morteros de Construcción* [Archivo PDF].
<https://personal.ua.es/en/servando-chinchon/documentos/-gestadm/documents/26-morteros-de-construccion.pdf>.
- Corinaldesi, V., Nardinocchi, A., & Donnini, J. (2016). *Reuse of recycled glass in mortar manufacturing*. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(SI), 140–151.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1246695>.
- De los Ángeles Columbié Lamorú, L., Crespo Castillo, R., Rodríguez Suárez, L., & González Batista, R. (2020). *Evaluación del uso de vidrio reciclado en la producción de hormigones cubanos*. *Minería y Geología*, 36(2), 218–233.
- Ecovidrio. (s.f.) *Reciclaje: Datos de Reciclaje*. <https://www.ecovidrio.es/reciclaje/datos-reciclaje>.
- Epdata. (21 de febrero de 2022). *El reciclaje de vidrio en España, datos y gráficos*.
<https://www.epdata.es/datos/reciclaje-vidrio-espana-datos-graficos/319>.
- EUROSTAT (diciembre, 2021); *Municipal Waste Statistics*, Statistics Explained
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics#Further_Eurostat_information.
- Flores Alés, V., Jiménez Bayarri, V., & Pérez Fargallo, A. (2018). *Influencia de la incorporación de vidrio triturado en las propiedades y el comportamiento a alta temperatura de morteros de cemento*. *Boletín de La Sociedad Española de*

- Cerámica y Vidrio, 57(6), 257–265.
<https://doi.org/10.1016/J.BSECV.2018.03.001>.
- Flores Alés, V., Alducin Ochoa, J. M., Martín del-Río, J. J., Torres González, M., & Jiménez Bayarri, V. (2020a). *Physical-mechanical behaviour and transformations at high temperature in a cement mortar with waste glass as aggregate*. *Journal of Building Engineering*, 29, 101158.
<https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.101158>.
- Flores Alés, V., Martín del-Río, J. J., Alducin Ochoa, J. M., & Torres González, M. (2020b). *Rehydration on high temperature-mortars based on recycled glass as aggregate*. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124139.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124139>
- Furlan, V., & Bisseger, P. (1975). *Les mortiers anciens. Histoire et essais d'analyse scientifique*. *Revue suisse d'Art et d'Archéologie*, 32: 1-14.
<http://doi.org/10.5169/seals-166356>
- Garfinkel, Y. (1987). *Yiftahel: A Neolithic Village from the Seventh Millenium BC in the Lower Galilee, Israel*. *Journal of Field Archeology*, 14: 199-214.
<https://doi.org/10.1179/009346987792208420>.
- Gorospe, K., Booya, E., Ghaednia, H., & Das, S. (2019). *Effect of various glass aggregates on the shrinkage and expansion of cement mortar*. *Construction and Building Materials*, 210, 301-311. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.192.
- Gorospe, K., Booya, E., Adesina, A., & Das, S. (2020). *Durability Properties of Mortar Overlays with Glass Aggregates*. *Structures Congress 2020 - Selected Papers from the Structures Congress 2020*, 251–259.
<https://doi.org/10.1061/9780784482896.024>.
- Guo, M. Z., Tu, Z., Poon, C. S., & Shi, C. (2018). *Improvement of properties of architectural mortars prepared with 100% recycled glass by CO2 curing*. *Construction and Building Materials*, 179, 138–150.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.188>.
- Hablando en Vidrio (31 de marzo de 2022). *¿Sabes qué es el calcín?* Ecovidrio.
<https://hablandoenvidrio.com/que-es-el-calcin/>.
- Hendi, A., Mostofinejad, D., Sedaghatdoost, A., Zohrabi, M., Naeimi, N., & Tavakolinia, A. (2019). *Mix design of the green self-consolidating concrete: Incorporating the*

- waste glass powder. *Construction and Building Materials*, 199, 369–384. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.020>.
- Instituto Nacional de Estadística (23 de noviembre de 2021) *Cuentas Ambientales: Cuentas de los Residuos. Últimos Datos*. https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177062&menu=ultiDatos&idp=1254735976603.
- Instituto Nacional de Estadística (2021). *Cuentas medioambientales: Cuentas de los residuos. Año 2019*. https://www.ine.es/prensa/cma_2019_res.pdf.
- Jangid, J. B., & Saoji, A. C. (2014). *Experimental investigation of waste glass powder as the partial replacement of cement in concrete production*. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 55–60. www.iosrjournals.org.
- Jing, G., Huang, G., & Zhu, W. (2020). *An Experimental Study on Water Permeability of Architectural Mortar Using Waste Glass as Fine Aggregate*. *Materials*, 13(1110), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ma13051110>.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development. Washington, DC: World Bank Group. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>.
- Khatib, J. M., Negim, E. M., Sohl, H. S., & Chileshe, N. (2012). *Glass powder utilisation in concrete production*. *European Journal of Applied Sciences*, 4(4), 173-176.
- Kumarappan, N. (2013). *Partial Replacement Cement in Concrete Using Waste Glass*. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(10), 1880–1883. www.ijert.org.
- Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases. *Boletín Oficial del Estado*, 99, de 25 de abril de 1997, 13270-13277. <https://www.boe.es/eli/es/l/1997/04/24/11>.
- Liu, Y., Shi, C., Zhang, Z., & Li, N. (2019). *An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials*. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 144, pp. 297–309). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.007>.
- Lu, J. X., & Poon, C. S. (2018). *Use of waste glass in alkali activated cement mortar*. *Construction and Building Materials*, 160, 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.080>.

- Małek, M., Łasica, W., Jackowski, M., & Kadela, M. (2020). *Effect of waste glass addition as a replacement for fine aggregate on properties of mortar*. *Materials*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/ma13143189>.
- Małek, M., Jackowski, M., Łasica, W., Kadela, M., & Wachowski, M. (2021). *Mechanical and Material Properties of Mortar Reinforced with Glass Fiber: An Experimental Study*. *Materials*, 14(698), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ma14030698>.
- Malinowski, R., & Garfinkel, Y. (1991). *Prehistory of concrete*. *Concrete International*, 13(3), 62-68.
- Marco, J., García, E., Más, M. I., Alcaraz, V., & Luizaga, A. (2012). *Estudio de la resistencia a compresión de morteros fabricados con conglomerante compuesto de polvo de vidrio*. *Informes de La Construcción*, 64(528), 529–536. <https://doi.org/10.3989/ic.11.100>.
- Martinet, G. (1991). *Les mortiers d'époque pharaonique à Karnak*. *Bulletin de liaison de Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 172, 157.
- Nassar, R. U. D., & Soroushian, P. (2012). *Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement*. *Construction and Building Materials*, 29, 368–377. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.10.061>.
- Nieves, A., Domínguez, F., Flores, F., & Gutiérrez, A. (2010). *Probabilidad y estadística para ingeniería*. 1a Ed, McGrawHill, México, 380–387.
- Nwaubani, S. O., & Poutos, K. I. (2013). *The Influence of Waste Glass Powder Fineness on the Properties of Cement Mortars*. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*, 2(2), 110–116. www.ijaiem.org.
- Paredes B, A. (2019). *Análisis de la resistencia a la compresión del concreto $F'c=210$ kg/cm² con adición de vidrio reciclado molido*. Tarapoto: UNSM.
- Peñafiel, D. (2016). *Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino*. Tesis de maestría. Universidad Técnica de Ambato. <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23038>.
- Puig Martínez, R. (2014) *Laboratorios de Materiales de Construcción*. La Habana. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. <https://www.researchgate.net/publication/321533840>.

- Rassineux, F.; Petit, J.C.; & Meunier, A. (1989) *Ancient analogues of modern cement: calcium hydrosilicates in mortars and concretes from Gallo-Roman Thermal Baths of Western France*. *Communications of the American Ceramic Society*, 72 (6): 1026-1032. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1989.tb06263.x>.
- Shayan, A., & Xu, A. (2004). *Value-added utilisation of waste glass in concrete*. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 81–89. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5).
- Soliman, N. A., & Tagnit-Hamou, A. (2016). *Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete*. *Construction and Building Materials*, 125, 600–612. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073>.
- Stepkowska, E.T., Blanes, J.M., Franco, F., Real, C., & Pérez-Rodríguez, J.L. (2004) *Phase Transformation on Heating of an Aged Cement Paste*. *Thermochimica Acta*, 420(79).
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill.
- Tuaum, A., Shitote, S., & Oyawa, W. (2018). *Experimental study of self-compacting mortar incorporating recycled glass aggregate*. *Buildings*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/buildings8020015>.
- Unión Europea. (s.f.). *Circular economy action plan*. Comisión Europea. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_es.
- Unión Europea. (1994). Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 1994, relativa a los envases y residuos de envases. *Diario oficial de las Comunidades Europeas*, 365, 10-24.
- Unión Europea. (1999). Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos. *Diario oficial de las Comunidades Europeas*, 182, 1-19.
- Unión Europea. (2018). Directiva (UE) 2018/849 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifican la Directiva 2000/53/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil, la Directiva 2006/66/CE relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores y la Directiva 2012/19/UE sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. *Diario oficial de la Unión Europea*, 150, 93-99.

- Unión Europea. (2018). Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifican la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos. *Diario oficial de la Unión Europea*, 150, 100-108.
- Unión Europea. (2018). Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifican la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos. *Diario oficial de la Unión Europea*, 150, 109-140.
- Unión Europea. (2018). Directiva (UE) 2018/852 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifican la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases. *Diario oficial de la Unión Europea*, 150, 141-154.
- Vandhiyan, R., Ramkumar, K., & Ramya, R. (2013). *Experimental Study On Replacement Of Cement By Glass Powder*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2(5), 234–238. www.ijert.org.
- Vasudevan, G., & Kanapathy Pillay, S. G. (2013). *Performance of Using Waste Glass Powder In Concrete As Replacement Of Cement*. American Journal of Engineering Research (AJER), 02(12), 175–181. www.ajer.org.
- Vázquez Romero, J. (2012). *Optimización granulométrica de morteros de base cemento*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). <https://oa.upm.es/11339/>.
- Vijayakumar, G., Vishaliny, H., & Govindarajulu, D. (2013). *Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3(2), 153–157. www.ijetae.com.
- Walpole, R. E., R.H. Myers, R.H., Myers Sh L., Ye K., (2012). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, 9.^a ed., Pearson, 246–250.

ANEXOS

Anexo A: Tipos de morteros y cantidad de probetas preparadas para ensayar

Tabla A.1: Identificación de los moldes y probetas por tipo de mortero y por proceso al que se sometieron antes de ser ensayadas

IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS				
Tipo de mortero	Temperatura ambiente		Temperatura a 800°C	
Mortero de Cemento de Referencia (MCR)	Molde n°1	Probeta n°1	Molde n°3	Probeta n°1
		Probeta n°2		Probeta n°2
		Probeta n°3		Probeta n°3
	Molde n°2	Probeta n°1	Molde n°4 (a hidratar)	Probeta n°1
		Probeta n°2		Probeta n°2
		Probeta n°3		Probeta n°3
Mortero de Cemento con 25% de vidrio (MC25)	Molde n°5	Probeta n°1	Molde n°6	Probeta n°1
		Probeta n°2		Probeta n°2
		Probeta n°3		Probeta n°3
	Molde n°7	Probeta n°1	Molde n°8 (a hidratar)	Probeta n°1
		Probeta n°2		Probeta n°2
		Probeta n°3		Probeta n°3
Mortero Bastardo de Referencia (MBR)	Molde n°9	Probeta n°1	Molde n°11	Probeta n°1
		Probeta n°2		Probeta n°2
		Probeta n°3		Probeta n°3
	Molde n°10	Probeta n°1	Molde n°12 (a hidratar)	Probeta n°1
		Probeta n°2		Probeta n°2
		Probeta n°3		Probeta n°3
Mortero Bastardo con 25% de vidrio (MB25)	Molde n°13	Probeta n°1	Molde n°15	Probeta n°1
		Probeta n°2		Probeta n°2
		Probeta n°3		Probeta n°3
	Molde n°14	Probeta n°1	Molde n°16 (a hidratar)	Probeta n°1
		Probeta n°2		Probeta n°2
		Probeta n°3		Probeta n°3

Anexo B: Resultados de los ensayos físicos

Tabla B.1: Pesos desecados, saturados y saturados sumergidos

Identificación de las Probetas			Curado 28 días			Tras calentamiento 800° C		
			Peso desecado	Peso saturado	Peso saturado sumergido	Peso desecado	Peso saturado	Peso saturado sumergido
Mortero de Cemento de Referencia (MCR)	Molde nº 2	Probeta nº 1	59.07	64.67	36.45	55.47	66.00	34.88
		Probeta nº 2	61.37	67.42	37.86	58.05	68.16	36.61
		Probeta nº 3 *	65.02	71.30	40.08	60.98		
	Molde nº 4	Probeta nº 1	56.94	62.41	35.12	53.43	64.25	33.76
		Probeta nº 2	50.22	54.91	31.02	47.43	55.78	30.06
		Probeta nº 3	57.07	62.19	35.06	53.61	64.74	33.76
Mortero de Cemento con 25% de vidrio (MC25)	Molde nº 6	Probeta nº 1	53.84	59.56	32.60	50.54	60.61	31.43
		Probeta nº 2	56.83	63.05	34.86	53.66	64.24	33.83
		Probeta nº 3	56.54	62.65	34.65	52.77	64.43	32.59
	Molde nº 8	Probeta nº 1	53.76	59.56	32.96	50.95	60.24	32.13
		Probeta nº 2	57.42	63.64	35.02	54.61	64.18	34.38
		Probeta nº 3	60.11	66.50	36.47	56.85	67.44	35.74
Mortero Bastardo de Referencia (MBR)	Molde nº 10:	Probeta nº 1 *	51.86	58.35	31.47	47.77		
		Probeta nº 2 *	50.95	57.37	30.88	43.14		
		Probeta nº 3 *	48.25	54.32	29.62	43.11		
	Molde nº 12:	Probeta nº 1 *	47.57	53.51	29.22	43.83		
		Probeta nº 2 *	48.08	55.05	29.81	43.06		
		Probeta nº 3 *	49.61	55.82	30.45	45.73		
Mortero Bastardo con 25% de vidrio (MB25)	Molde nº 14:	Probeta nº 1 *	54.96	62.16	33.55	50.60		
		Probeta nº 2 *	56.43	63.72	34.13	52.40		
		Probeta nº 3 *	58.10	65.67	35.39	53.40		
	Molde nº 16:	Probeta nº 1 *	45.08	50.87	27.60	41.90	52.02	25.89
		Probeta nº 2 *	50.34	56.91	30.70	47.16	57.74	28.81
		Probeta nº 3 *	48.70	54.91	29.28	45.13		

* No se pudieron obtener los pesos saturados y saturados sumergidos para estas muestras después del calentamiento debido a la desintegración que produjo la reacción álcalis-sílice al ser hidratadas.

Tabla B.2: Densidades aparentes y porosidades abiertas

Identificación Probeta	Curado 28 días		Tras calentamiento 800° C	
	Da (g/cm ³)	Pa (%)	Da (g/cm ³)	Pa (%)
MCR_M2-P1	2.09	19.84	1.78	33.84
MCR_M2-P2	2.08	20.47	1.84	32.04
MCR_M2-P3*	2.08	20.12		
MCR_M4-P1	2.09	20.04	1.75	35.49
MCR_M4-P2	2.10	19.63	1.84	32.47
MCR_M4-P3	2.10	18.87	1.73	35.93
MC25_M6-P1	2.00	21.22	1.73	34.51
MC25_M6-P2	2.02	22.06	1.76	34.79
MC25_M6-P3	2.02	21.82	1.66	36.62
MC25_M8-P1	2.02	21.80	1.81	33.05
MC25_M8-P2	2.01	21.73	1.83	32.11
MC25_M8-P3	2.00	21.28	1.79	33.41
MBR_M10-P1*	1.93	24.14		
MBR_M10-P2*	1.92	24.24		
MBR_M10-P3*	1.95	24.57		
MBR_M12-P1*	1.96	24.45		
MBR_M12-P2*	1.90	27.61		
MBR_M12-P3*	1.96	24.48		
MB25_M14-P1*	1.92	25.17		
MB25_M14-P2*	1.91	24.64		
MB25_M14-P3*	1.92	25.00		
MB25_M16-P1	1.94	24.88	1.60	38.73
MB25_M16-P2	1.92	25.07	1.63	36.57
MB25_M16-P3*	1.90	24.23		

* No se pudieron obtener las densidades aparentes y porosidades abiertas ya que no se contaba con los pesos saturados y saturados sumergidos para estas muestras después del calentamiento debido a la desintegración que produjo la reacción álcalis-sílice al ser hidratadas.

LEYENDA (Ejemplos identificación Probetas)	
MCR_M2-P1	Mortero Cemento Referencia (molde 2, probeta 1)
MC25_M6-P3	Mortero Cemento 25% vidrio (molde 6, probeta 3)
MBR_M12-P2	Mortero Bastardo Referencia (molde 12, probeta 2)
MB25_M14-P3	Mortero Bastardo 25% vidrio (molde 14, probeta 3)

Anexo C: Resultados de los ensayos mecánicos

Tabla C.1: Resistencias a flexión y compresión

Tipo de mortero	Temperatura	Identificación		Flexión (Kg)	Compresión (Kg)	
					Trozo N°1	Trozo N°2
Mortero de Cemento de Referencia (MCR)	Temperatura ambiente	Molde n°1	Probeta n°1	275	5 954	6 147
			Probeta n°2	245	5 592	5 514
			Probeta n°3	240	5 273	5 745
		Molde n°2	Probeta n°1	256	5 178	5 134
			Probeta n°2	247	5 262	4 991
			Probeta n°3	249	5 240	5 203
	Temperatura a 800°C	Molde n°3	Probeta n°1	25	946	961
			Probeta n°2	24	626	1 026
			Probeta n°3	15	870	714
		Molde n°4 (a hidratar)*	Probeta n°1			
			Probeta n°2			
			Probeta n°3			
Mortero de Cemento con 25% de vidrio (MC25)	Temperatura ambiente	Molde n°5	Probeta n°1	192	4 276	4 213
			Probeta n°2	179	4 315	3 812
			Probeta n°3	207	4 245	4 453
		Molde n°7	Probeta n°1	197	4 953	5 141
			Probeta n°2	213	4 323	4 456
			Probeta n°3	211	4 759	4 652
	Temperatura a 800°C	Molde n°6	Probeta n°1	11	448	437
			Probeta n°2	19	493	442
			Probeta n°3	16	387	415
		Molde n°8 (a hidratar)*	Probeta n°1			
			Probeta n°2			
			Probeta n°3			
Mortero Bastardo de Referencia (MBR)	Temperatura ambiente	Molde n°9	Probeta n°1	20	1 649	709
			Probeta n°2	84	1 546	1 676
			Probeta n°3	40	1 685	1 422
		Molde n°10	Probeta n°1	41	1 448	1 722
			Probeta n°2	97	1 482	1 359
			Probeta n°3	47	1 392	1 211
	Temperatura a 800°C	Molde n°11	Probeta n°1	7	220	194
			Probeta n°2	9	163	150
			Probeta n°3	7	200	196
		Molde n°12 (a hidratar)*	Probeta n°1			
			Probeta n°2			
			Probeta n°3			

Incorporación de vidrios reciclados en la fabricación de nuevos materiales de bajo impacto ambiental.

Tipo de mortero	Temperatura	Identificación		Flexión (Kg)	Compresión (Kg)	
					Trozo N°1	Trozo N°2
Mortero Bastardo con 25% de vidrio (MB25)	Temperatura ambiente	Molde n°13	Probeta n°1	63	1 633	1 567
			Probeta n°2	54	1 811	1 716
			Probeta n°3	113	1 765	1 877
		Molde n°14	Probeta n°1	46	1 520	1 484
			Probeta n°2	48	1 447	1 393
			Probeta n°3	52	1 434	1 491
	Temperatura a 800°C	Molde n°15	Probeta n°1	3	141	105
			Probeta n°2	5	102	95
			Probeta n°3	5	90	139
		Molde n°16 (a hidratar)*	Probeta n°1			
			Probeta n°2			
			Probeta n°3			

* No se pudieron obtener las resistencias a flexión y compresión para estas muestras después del calentamiento debido a la desintegración que produjo la reacción álcali-sílice al ser hidratadas.