



UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ÁVILA

***- MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOTECNOLOGÍAS CARTOGRÁFICAS
EN INGENIERÍA Y ARQUITECTURA-***



MÁSTER UNIVERSITARIO
GEOTECNOLOGÍAS CARTOGRÁFICAS

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE HORMIGONES
ELABORADOS CON ÁRIDOS PROCEDENTES DE
RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN MEDIANTE
CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES 3D**

Alumno: Jorge López Rebollo

Tutores: Dr. Diego González Aguilera

Dr. Luis Javier Sánchez Aparicio

Julio de 2020

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE HORMIGONES
ELABORADOS CON ÁRIDOS PROCEDENTES DE
RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN MEDIANTE
CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES 3D**

Alumno: Jorge López Rebollo

Tutores: Dr. Diego González Aguilera

Dr. Luis Javier Sánchez Aparicio

Julio de 2020

RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Máster se propone una metodología para el análisis de las propiedades mecánicas de hormigones reciclados a partir de la correlación digital de imágenes 3D. El enfoque 3D-DIC es implementado con los ensayos de compresión del hormigón de manera que pueda llevarse a cabo la caracterización mecánica y comparativa de dos tipos de hormigón fabricados con áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón y cerámicos.

Para este fin, se presenta una configuración y protocolo 3D-DIC basado en el software de código abierto MultiDIC que permite obtener la reconstrucción tridimensional de una región de interés para cada probeta y calcular su correspondiente campo completo de desplazamientos. Datos que son capturados a través de un equipo de bajo coste constituido por dos cámaras DSLR Canon 700D, cada una de ellas equipada con un objetivo macro Canon 60 mm, las cuales son sincronizadas a través de un PLC y una plataforma de adquisición de datos Quantum. La iluminación de dicho sistema es conseguida a través de dos focos LED de luz neutra que logran tiempos de exposición y contrastes adecuados durante la captura y la correlación de imágenes.

A partir de los datos obtenidos con este enfoque, se lleva a cabo un análisis de las deformaciones producidas en cada una de las probetas mediante la colocación de extensómetros virtuales. Los numerosos datos obtenidos en comparación con las mediciones puntuales de los métodos tradicionales permiten monitorizar el comportamiento heterogéneo de este tipo de materiales.

Por último, se realiza un estudio comparativo de los valores de deformación obtenidos junto con las cargas asociadas a cada uno de ellos. Este análisis permite obtener la variabilidad espacial de las propiedades de cada una de las probetas, así como la diferencia entre el comportamiento de los dos tipos de hormigón analizados.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primer lugar, a mis tutores Diego y Luis Javier. Por toda la ayuda facilitada para la realización de este TFM, buscando siempre la mejor solución posible para superar todos los obstáculos que han ido apareciendo en el camino.

También agradecer al resto de miembros del Grupo de Investigación TIDOP. Por el trabajo en equipo y el ambiente de sabiduría que se respira en el laboratorio, así como su disposición para colaborar en todo lo necesario.

Por supuesto, agradecer a todos y cada uno de los profesores de la Escuela Politécnica Superior de Ávila. Por aportar cada uno de ellos su granito de arena en mi formación, tanto académica como personal, durante los cuatro años en el Grado y este último año en el Máster.

Por último, en lo personal, agradecer a mi familia, a mis amigos y a mi novia por el apoyo mostrado durante estos duros e intensos meses de trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	iii
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
3. CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES RECICLADOS.....	7
3.1. Áridos reciclados	7
3.2. Propiedades mecánicas	9
3.3. Aplicaciones	10
4. CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES 3D (3D-DIC).....	13
4.1. Introducción.....	13
4.2. Esquema de funcionamiento.....	16
4.2.1. Preparación de las probetas	17
4.2.2. Orientación de las cámaras.....	19
4.2.2.1. Calibración	20
4.2.2.2. Orientación externa	21
4.2.3. Cálculo de desplazamientos y deformaciones.....	22
4.2.3.1. Algoritmos DIC.....	23
4.2.3.2. Reconstrucción 3D	26
5. CAMPAÑA EXPERIMENTAL	29
5.1. Dosificación empleada	29
5.2. Caracterización del hormigón.....	30
5.3. Prototipo de adquisición de datos	31

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
6.1. Configuración del ensayo	35
6.2. Orientación de las cámaras	37
6.2.1. Orientación ensayos a 7 días	38
6.2.2. Orientación ensayos a 28 días	41
6.3. Correlación y reconstrucción 3D.....	44
6.4. Análisis de desplazamientos y deformaciones	47
6.4.1. Extensómetros virtuales	48
6.4.2. Curvas Tensión-Deformación	49
6.5. Discusión de resultados	53
6.5.1. Resistencia a compresión y deformación máxima	53
6.5.2. Aproximación del módulo secante de elasticidad	55
7. CONCLUSIONES.....	57
REFERENCIAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Composición típica de los residuos de construcción y demolición en España. Fuente: (M. P. Alaejos et al., 2008).	8
Figura 2: Áridos procedentes de RCD. a) Áridos reciclados de hormigón; b) Áridos reciclados cerámicos; c) Áridos reciclados mixtos. Fuente: (MásQueIngeniería, 2018).	9
Figura 3: Árido reciclado constituido por árido natural y mortero adherido. Fuente: Adaptado de (Bai, Zhu, Liu, & Liu, 2020).	9
Figura 4: Base para carretera a partir de áridos reciclados. Fuente: (Hoy, 2020).	11
Figura 5: Puente atirantado sobre el río Turia de hormigón fabricado con un 20% de áridos reciclados. Fuente: (P. Alaejos et al., 2005).	12
Figura 6: Carril bici con pavimento de hormigón reciclado. Fuente: (Ieca, 2013).	12
Figura 7: Procedimiento de la técnica 3D-DIC. Fuente: (Bing Pan, 2018).	17
Figura 8: Patrones de speckle. a) Patrón natural (granito); b) Patrón artificial diseñado por computadora; y c) Patrón artificial aplicado con aerosol. Fuente: Elaboración propia.	18
Figura 9: Matching de puntos en las imágenes mediante 3D-DIC. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 10: Representación gráfica del método DIC: a) Evaluación del desplazamiento generado por un subconjunto; b) Grados de libertad asumidos durante el análisis de los desplazamientos. u y v representa la translación del subconjunto en las direcciones x e y. du / dy y dv / dx representan la deformación cortante del subconjunto en las direcciones x e y. Fuente: (García-Martin et al., 2020)	24
Figura 11: Workflow algoritmo RG-DIC. Fuente: (Blaber et al., 2015).	26
Figura 12: Probetas fabricadas de hormigón reciclado con refrentado de azufre. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 13: Prototipo de adquisición de datos. a) Plataforma de cámaras y unidades de iluminación; b) Conexiones PLC y Quantum; c) Esquema unifilar conexiones. Fuente: Elaboración propia	33
Figura 14: Detalle del patrón de Speckle generado. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 15: Configuración del prototipo empleado para 3D-DIC. Fuente: Elaboración propia.	37

Figura 16: Objeto de calibración cilíndrico. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 17: Errores de reproyección calibración interna cámara izquierda. a) Distribución de los errores de reproyección de los puntos; b) Error de reproyección medio por imagen. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 18: Errores de reproyección calibración interna cámara derecha. a) Distribución de los errores de reproyección de los puntos; b) Error de reproyección medio por imagen. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 19: Reconstrucción 3D mediante DLT para ensayos a 7 días. a) Puntos reconstruidos y puntos verdaderos; b) Dirección de errores de reconstrucción; c) Errores de reconstrucción en cada eje. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 20: Errores de reproyección calibración interna cámara izquierda. a) Distribución de los errores de reproyección de los puntos; b) Error de reproyección medio por imagen. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 21: Errores de reproyección calibración interna cámara derecha. a) Distribución de los errores de reproyección de los puntos; b) Error de reproyección medio por imagen. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 22: Reconstrucción 3D mediante DLT para ensayos a 28 días. a) Puntos reconstruidos y puntos verdaderos; b) Dirección de errores de reconstrucción; c) Errores de reconstrucción en cada eje. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 23: Coeficiente de correlación C_L s de las imágenes 2D en la Región de Interés (ROI). a) Imagen de cámara izquierda; b) Imagen de cámara derecha. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 24: Puntos de imagen correspondientes detectados mediante DIC con su coeficiente de correlación. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 25: Desplazamientos obtenidos a través del enfoque 3D-DIC en la probeta ZC1. a) Desplazamientos X en mm; b) Desplazamientos Y en mm; c) Desplazamientos Z en mm. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 26: Evaluación de la deformación longitudinal mediante extensómetros virtuales. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 27: Curva tensión/deformación de la probeta ZH1 a 7 días. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 28: Curva tensión/deformación de la probeta ZH2 a 7 días. Fuente: Elaboración propia.	50

Figura 29: Curva tensión/deformación de la probeta ZH3 a 28 días. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 30: Curva tensión/deformación de la probeta ZH4 a 28 días. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 31: Curva tensión/deformación de la probeta ZC1 a 7 días. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 32: Curva tensión/deformación de la probeta ZC2 a 7 días. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 33: Curva tensión/deformación de la probeta ZC3 a 28 días. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 34: Curva tensión/deformación de la probeta ZC4 a 28 días. Fuente: Elaboración propia.	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Enfoque 2D-DIC vs 3D-DIC.....	15
Tabla 1: Dosificación amasada hormigón 40l.	29
Tabla 2: Especificaciones técnicas Servosis ME-405/50/5.	31
Tabla 3: Especificaciones técnicas cámara digital Canon EOS 700D y sistema de lentes macro empleado.	32
Tabla 4: MIG y factor de cobertura de las probetas ensayadas.	36
Tabla 5: Parámetros intrínsecos cámara izquierda para ensayos a 7 días. Unit* Pixel; Unit** °.	38
Tabla 6: Parámetros intrínsecos cámara derecha para ensayos a 7 días. Unit* Pixel; Unit** °.	39
Tabla 7: Parámetros DLT de las cámaras para ensayos a 7 días.	40
Tabla 8: Parámetros intrínsecos cámara izquierda para ensayos a 28 días. Unit* Pixel; Unit** °.	41
Tabla 9: Parámetros intrínsecos cámara derecha para ensayos a 28 días. Unit* Pixel; Unit** °.	42
Tabla 10: Parámetros DLT de las cámaras para ensayos a 28 días.	43
Tabla 11: Diámetros de las probetas (mm).....	46
Tabla 12: Resultados obtenidos de la caracterización mecánica empleando el enfoque 3D-DIC para la Resistencia a compresión a 7 días en MPa (f_{c7}), la Tensión máxima previa a la rotura en MPa (f_c) y la Deformación para la tensión máxima en mm/mm (ϵ_{max}). Coeficiente de Variación (CoV) en %.	53
Tabla 13: Resultados obtenidos de la caracterización mecánica empleando el enfoque 3D-DIC para la Resistencia a compresión a 28 días en MPa (f_{c28}), la Tensión máxima previa a la rotura en MPa (f_c) y la Deformación para la tensión máxima en mm/mm (ϵ_{max}). Coeficiente de Variación (CoV) en %.....	53
Tabla 14: Resultados obtenidos de la caracterización mecánica empleando el enfoque 3D-DIC para la aproximación del módulo secante de elasticidad a 7 días en MPa ($f_c/3/\epsilon_{max}$). Coeficiente de variación (CoV) en %.....	55

Tabla 15: Resultados obtenidos de la caracterización mecánica empleando el enfoque 3D-DIC para la aproximación del módulo secante de elasticidad a 28 días en MPa ($f_c/3/\epsilon_{max}$). Coeficiente de variación (CoV) en %.....	56
--	----

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es considerada el mayor consumidor de recursos naturales no renovables, siendo también un importante generador de residuos. El elevado consumo de recursos está justificado por la alta demanda de hormigón del sector, siendo éste el material artificial más empleado del mundo (Fernández-Canovas, 2013). Si bien es cierto que las materias primas (agregados naturales) empleadas para su fabricación son recursos muy abundantes, la elevada explotación de los mismos y los costes derivados de su extracción conllevan una problemática que puede provocar la escasez de este tipo de materiales a medio-largo plazo en muchos países donde su producción es muy elevada (UNEP, 2014). La construcción también es considerada una industria sucia debido a la elevada generación de residuos tanto en su fase de extracción como en la demolición de elementos que han concluido su vida útil. Por ejemplo, en la Unión Europea se estima que se producen cerca de 1.000 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD) al año (Eurostat, 2018). La mayor parte de estos residuos son depositados en vertederos, con el consecuente impacto visual, paisajístico y ecológico negativo que ello supone. En este contexto, se hace necesaria una gestión eficaz con el fin de reducir tanto la cantidad de recursos consumidos como la cantidad de residuos generados, aprovechando su potencial como material secundario de acuerdo con los conceptos de desarrollo sostenible y economía circular.

En la actualidad, se estima que un tercio de los RCD generados son tratados y empleados en múltiples aplicaciones (Eurostat, 2018) que van desde el relleno de zanjas, pozos, obras de tierra y terraplenes hasta la generación de bases y sub-bases para la construcción de carreteras (Cardoso, Silva, de Brito, & Dhir, 2016). El elevado consumo de hormigón a nivel mundial y la creciente preocupación por la escasez de recursos y problemas medioambientales comentados anteriormente, ha provocado que en los últimos años exista una tendencia a la utilización de áridos reciclados procedentes de RCD en la fabricación del hormigón. No obstante, los principales problemas de la utilización de este tipo de áridos para la fabricación de hormigones radican en la elevada capacidad de absorción debido a la presencia de material cerámico y mortero adherido a la superficie de los áridos (McNeil & Kang, 2013; Medina, Zhu, Howind, Frías, & de Rojas, 2015), lo

que provoca que las prestaciones mecánicas de los hormigones resultantes sean menores. En este sentido, la legislación española que regula las condiciones de los materiales reciclados para su empleo en hormigones (Concrete Permanent, 2008) es bastante exigente tanto en sus propiedades físicas como químicas, dificultando en la mayoría de los casos el empleo de este tipo de materiales para la fabricación de hormigones estructurales por los elevados requisitos en el tratamiento de los residuos (Martín-Morales, Zamorano, Ruiz-Moyano, & Valverde-Espinosa, 2011). En consecuencia, se establece la necesidad de buscar aplicaciones alternativas en las que el hormigón resultante del empleo de áridos reciclados no requiera de altas prestaciones mecánicas, es decir, hormigones no estructurales. Múltiples estudios se han llevado a cabo analizando diferentes enfoques de aplicabilidad para este tipo de hormigones no estructurales entre los que se encuentran adoquines (Juan-Valdés, Rodríguez-Robles, García-González, Guerra-Romero, & Morán-del Pozo, 2018), bordillos (Rodríguez et al., 2016), bloques (Guo, Tu, Chen, & Lehman, 2018; Martín-Morales, Cuenca-Moyano, Valverde-Espinosa, & Valverde-Palacios, 2017) e incluso piezas de mobiliario urbano prefabricado (Sánchez Roldán, 2019).

Estas nuevas soluciones de hormigón fabricadas con áridos reciclados tienen comportamientos muy dispares, siendo una de las principales variables que más afectan a las prestaciones el porcentaje de reemplazo de áridos naturales. En este sentido, numerosos estudios han analizado el comportamiento de acuerdo a diferentes dosificaciones (Etxeberria, Vázquez, Marí, & Barra, 2007; Nepomuceno, Isidoro, & Catarino, 2018; Rodríguez et al., 2016), sugiriendo una menor resistencia a compresión para mayores porcentajes de reemplazo del árido natural, así como una mayor deformación y un menor módulo de elasticidad. No obstante, otros estudios (Medina, De Rojas, & Frías, 2012) sugieren que las prestaciones de los hormigones reciclados son similares a los hormigones fabricados con áridos naturales, incluso superiores en cuanto a su rendimiento a tracción (Mansur, Wee, & Lee, 1999).

La diversidad de resultados está determinada en gran parte por la variabilidad de las dosificaciones empleadas, así como los diferentes tipos de áridos reciclados y su procedencia (hormigón o cerámicos). Este tipo de materiales aumentan la heterogeneidad de las soluciones de hormigón al mostrar un comportamiento muy dispar si no se realiza una selección y tratamiento de los residuos adecuada debido a la negativa influencia del mortero adherido, las impurezas y los contaminantes en los áridos (Rahal, 2007). En este

sentido, es imprescindible tener una visión global a la hora de realizar la caracterización de este tipo de soluciones, ya que el comportamiento heterogéneo y altamente irregular de los hormigones reciclados puede llevar a resultados locales singulares y erróneos que estén muy alejados del comportamiento global del material. Con el fin de evitar los análisis locales obtenidos mediante métodos de medición tradicionales como las galgas extensiométricas, se han desarrollado diversos métodos ópticos de campo completo, entre los que destaca la Correlación Digital de Imágenes (DIC). Este método permite obtener un campo completo de desplazamientos y deformaciones mediante el uso de procedimientos de correspondencia basados en correlaciones y algoritmos de diferenciación numérica (Sutton, Orteu, & Schreier, 2009). Gracias a este enfoque global, la correlación digital de imágenes se ha utilizado ampliamente para el análisis y caracterización de diversos materiales heterogéneos como madera (Zink, Davidson, & Hanna, 2007), composites (García-Martin et al., 2020) u hormigones (Abdulqader & Rizos, 2020). En este último campo hay estudios que abarcan tanto la medición de deformaciones (Le, Tran, Torero, & Dao, 2019) como el análisis de grietas (Kozicki & Tejchman, 2013; Liu, Guo, Wen, Zhou, & Deng, 2020) e incluso la caracterización de la influencia del tamaño de árido en las contracciones por secado (Chen, Wei, Huang, Jin, & Yu, 2018).

Atendiendo a la naturaleza de las probetas a ensayar y la importancia de los desplazamientos en diferentes planos, la correlación digital de imágenes puede ser aplicada tanto en su enfoque bidimensional como tridimensional. Ambos enfoques han sido empleados para análisis en el plano de probetas cúbicas mediante 2D-DIC (Kozicki & Tejchman, 2013; Liu et al., 2020), así como análisis en probetas no planas mediante 3D-DIC (Chen et al., 2018; Dzaye, Tsangouri, Spiessens, De Schutter, & Aggelis, 2019; Le et al., 2019). En este contexto, la técnica 3D-DIC permite la consideración de variaciones fuera del plano principal de estudio, lo que se hace indispensable en el caso de emplear probetas cilíndricas y a la hora de evaluar el comportamiento global de la probeta.

No obstante, la integración de DIC en estudios de caracterización de hormigones reciclados no ha sido abordada en la extensa literatura analizada a pesar del auge del uso de estos nuevos materiales y las ventajas que esta técnica presenta para evaluar su marcado comportamiento heterogéneo. Los resultados obtenidos por este método permiten una visión del comportamiento global, permitiendo realizar una evaluación de

la distribución de las deformaciones sufridas durante el proceso de ensayo tanto de manera temporal como de manera espacial en comparación con las medidas puntuales que proporcionan los métodos de medición convencionales. El empleo de la correlación digital de imágenes, concretamente el enfoque 3D, permitirá por lo tanto estudiar el comportamiento de campo completo en la probeta y establecer relaciones entre las deformaciones sufridas por unos y otros hormigones atendiendo a criterios de distribución.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente TFM es **avanzar en la integración efectiva del enfoque 3D-DIC para la evaluación y caracterización de hormigones fabricados con áridos reciclados**, en sustitución de técnicas de medición convencionales que resultan invasivas y destructivas.

Como objetivos específicos para alcanzar el objetivo principal de este TFM se pueden establecer los siguientes:

- a) Validación del enfoque tridimensional de la correlación digital de imágenes en sustitución del enfoque bidimensional.
- b) Establecer un prototipo para la aplicación de la técnica de Correlación Digital de Imágenes 3D, así como un procedimiento para la calibración y el procesado de imágenes.
- c) Implementar las deformaciones obtenidas con la Correlación Digital de Imágenes 3D en los valores de carga resultantes del ensayo de rotura de hormigones según la norma UNE-EN 12390-3 "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*".
- d) Elaborar las curvas de tensión-deformación a partir de los datos obtenidos conjuntamente de carga y deformación.
- e) Realizar un análisis de distribución espacial de las deformaciones en la probeta y un estudio estadístico de la variabilidad de los resultados obtenidos.

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES RECICLADOS

El hormigón es el material de construcción artificial más empleado del mundo (Fernández-Canovas, 2013), tanto para usos en el ámbito de la Ingeniería Civil como de la Arquitectura. Se trata de un material conformado por una mezcla de cemento, agua, aditivos y áridos (arena y grava), representando este último en torno a un 75% del total del peso (en función de la dosificación).

A pesar de que los áridos tienen un coste relativo inferior al resto de elementos, el elevado volumen necesario para la fabricación del hormigón hace que en torno al 25% de su precio final sea asociado a los áridos tanto gruesos como finos. Desde este punto de vista, la sustitución de los áridos naturales por áridos procedentes de residuos de construcción y demolición para la fabricación de hormigones reciclados supone una ventaja tanto ecológica como económica. En este sentido, se estima que el coste de los áridos reciclados es de aproximadamente un tercio del coste de los áridos naturales (M. P. Alaejos, Sánchez, Sinis, & Cano, 2008).

3.1. Áridos reciclados

Los denominados hormigones reciclados son aquellos en los que los áridos naturales son sustituidos parcial o totalmente por áridos reciclados. Este tipo de áridos son aquellos que proceden de residuos de construcción y demolición y son procesados para proporcionar recursos para un nuevo uso. Los materiales que constituyen estos residuos plantean una distribución similar a la mostrada en la Figura 1 (M. P. Alaejos et al., 2008), estando constituidos en su mayoría por productos cerámicos u hormigones.

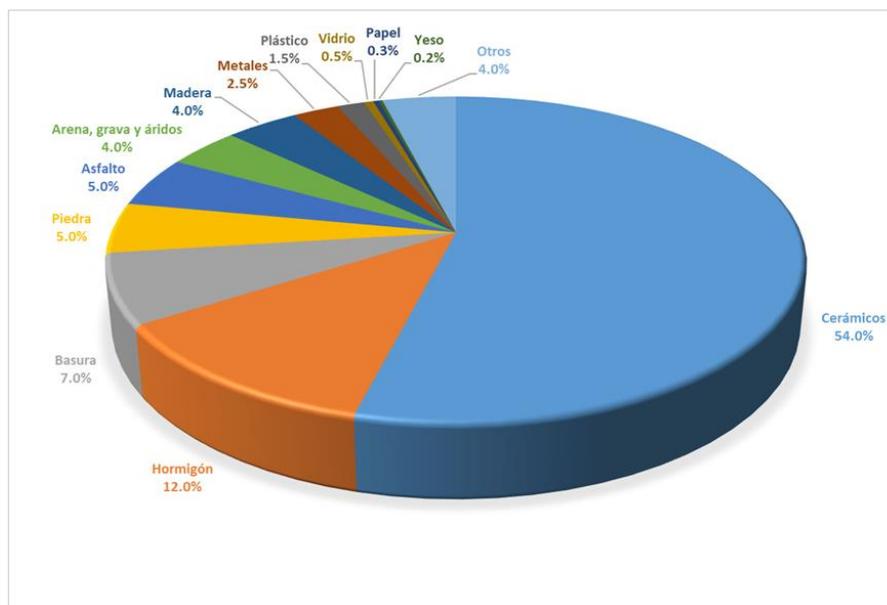


Figura 1: Composición típica de los residuos de construcción y demolición en España. Fuente: (M. P. Alaejos et al., 2008).

De acuerdo a esta constitución de los RCD, La "Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición" (Asociación Española de Gestores de Rcd, 2012) establece las siguientes categorías para los áridos reciclados:

- Áridos reciclados de hormigón (Figura 2a), obtenidos tras el machaqueo, cribado y procesado de residuos de hormigón, con un contenido de hormigón y piedra natural (sin mortero adherido) del 90% o más en peso.
- Áridos reciclados cerámicos (Figura 2b), obtenidos del procesamiento de residuos cerámicos (ladrillos, tejas o baldosas) con un contenido de material cerámico superior al 70%.
- Áridos reciclados mixtos (Figura 2c), obtenidos a partir de mezcla de diferentes materiales cerámicos, de hormigón, áridos no ligados, etc. Por un lado, los mixtos de hormigón, son aquellos en los que el contenido de hormigón y piedra es inferior al 90% y el de material cerámico inferior al 30%. Por otro lado, los mixtos cerámicos son aquellos en los que su contenido cerámico es superior al 30%;
- Áridos reciclados con asfalto, con un contenido de materiales bituminosos entre el 5% y el 30%.



Figura 2: Áridos procedentes de RCD. a) Áridos reciclados de hormigón; b) Áridos reciclados cerámicos; c) Áridos reciclados mixtos. Fuente: (MásQueIngeniería, 2018).

3.2. Propiedades mecánicas

La principal diferencia entre los áridos reciclados y los áridos naturales es la presencia de mortero adherido a la superficie de los áridos (Figura 3), que provoca una modificación de las propiedades mecánicas de los áridos originales (Martín-Morales et al., 2011). En este sentido, los áridos ven reducidas sus prestaciones mecánicas, aumentando la absorción de agua, el índice de trituración y el coeficiente de desgaste de Los Ángeles (Duan & Poon, 2014).

La introducción de tecnologías avanzadas de procesado y tratamiento de áridos permite la eliminación de parte de este mortero adherido (Nagataki, Gokce, Saeki, & Hisada, 2004) aumentando la densidad de los áridos y mejorando sus prestaciones. Sin embargo, el elevado coste de este tipo de procesados supone la pérdida de una de las principales ventajas del empleo de este tipo de áridos: el ahorro de costes en extracción y tratamiento. Por ello, el empleo de áridos procedentes directamente de RCD es considerada como la aplicación más ventajosa. Como consecuencia de ello, el comportamiento del hormigón resultante se ve afectado considerablemente, aumentando la incertidumbre y variabilidad debido a la heterogeneidad de los áridos.



Figura 3: Árido reciclado constituido por árido natural y mortero adherido. Fuente: Adaptada de (Bai, Zhu, Liu, & Liu, 2020).

Entre las propiedades mecánicas más afectadas de este tipo de hormigones se encuentran su resistencia a compresión y su deformación. Debido a la heterogeneidad de los áridos reciclados, su composición y procedencia, resulta complicado establecer una relación directa respecto a estas propiedades. No obstante, existe una tendencia generalizada a una menor resistencia a compresión y una mayor deformación a medida que el porcentaje de sustitución de áridos naturales por áridos reciclados es mayor (Bai et al., 2020).

En este sentido, el reemplazo total - finos y gruesos - de áridos naturales por áridos reciclados, supone una mayor incertidumbre respecto a las propiedades mecánicas del hormigón resultante. El empleo de áridos sin realizar una selección y tratamiento de los mismos conllevará una heterogeneidad y disparidad en cuanto al comportamiento debido a la incorporación de mortero adherido a su superficie y otros contaminantes (Rahal, 2007).

3.3. Aplicaciones

La creciente preocupación por el reciclado de los residuos de construcción y demolición ha llevado a su empleo en un amplio abanico de aplicaciones relacionadas con el ámbito de la Ingeniería Civil y la Arquitectura.

De manera particular, las obras relacionadas con las carreteras han tratado de emplear en reiteradas ocasiones los áridos reciclados debido a la gran cantidad de áridos que son necesarias para su ejecución (Bustillo, 2010). Entre las aplicaciones en este ámbito se encuentran la generación de bases y sub-bases (Figura 4) para la construcción de carreteras (Cardoso et al., 2016); las mezclas bituminosas recicladas para su empleo como capas de rodaduras (Martinho, Picado-Santos, & Capitaó, 2018); o los rellenos y terraplenes (Bustillo, 2010).



Figura 4: Base para carretera a partir de áridos reciclados. Fuente: (Hoy, 2020).

Si bien la mayoría de las normativas impiden el uso de áridos reciclados como sustitución de los áridos finos para la fabricación del hormigón (Concrete Permanent, 2008), no existe ninguna prohibición sobre su uso en morteros. En este sentido, existen también cada vez más estudios sobre la viabilidad del empleo de este tipo de áridos en sustitución de áridos naturales tanto para morteros de albañilería (de Oliveira Andrade, Possan, Squiavon, & Ortolan, 2018) como morteros para revestimiento (Corinaldesi, 2012).

Respecto al empleo de áridos procedentes de RCD para la fabricación de hormigones reciclados, existe una amplia bibliografía que muestra las numerosas aplicaciones estudiadas.

Por un lado, los hormigones para usos estructurales se encuentran con mayores limitaciones debido a las exigencias y requisitos de las normativas (Concrete Permanent, 2008) tanto para sus propiedades físicas como químicas. No obstante, a pesar de la percepción de la peor calidad de este tipo de hormigones, existen estudios que avalan su empleo para usos estructurales (González-Fonteboa et al., 2018). En este sentido, pueden encontrarse algunas aplicaciones reales como el reemplazo del puente atirantado sobre el río Turia (Figura 5) (P. Alaejos, Domingo, & Monleón, 2005) que se llevó a cabo con hormigón fabricado con un 20% de áridos reciclados procedentes de la demolición del antiguo puente. Además, se han llevado a cabo investigaciones en elementos estructurales a escala real, donde la evaluación del comportamiento estructural ha mostrado que los

posibles defectos causados por el uso de áridos reciclados se ve atenuado con el empleo del acero de refuerzo (De Brito, Ferreira, Pacheco, Soares, & Guerreiro, 2016).



Figura 5: Puente atirantado sobre el río Turia de hormigón fabricado con un 20% de áridos reciclados. Fuente: (P. Alaejos et al., 2005).

Por otro lado, el mayor nicho de aplicaciones de los hormigones fabricados con áridos reciclados se encuentra en su empleo para usos no estructurales, donde las limitaciones normativas son menores. Por ejemplo la EHE (Concrete Permanent, 2008) establece la posibilidad de sustitución del 100% de los áridos gruesos. No obstante, existen estudios que avalan la posible sustitución de la totalidad de los áridos (López-Uceda et al., 2016) para la fabricación de hormigones de baja resistencia.

En este sentido, aplicaciones como hormigones de relleno o nivelación; aceras o carriles bici (Figura 6); cunetas o acequias; e incluso elementos prefabricados aumentan notablemente las posibilidades de uso de este tipo de hormigones reciclados.



Figura 6: Carril bici con pavimento de hormigón reciclado. Fuente: (Ieca, 2013).

4. CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES 3D (3D-DIC)

4.1. Introducción

La correlación digital de imágenes (DIC) es una técnica óptica que emplea métodos de seguimiento y registro de imágenes y permite llevar a cabo mediciones de forma, desplazamiento y deformación de campo completo (Sutton et al., 2009). La técnica DIC emplea las imágenes digitales adquiridas en diferentes estados de carga y realiza un análisis de correlación de las mismas empleando algoritmos de la fotogrametría y la visión computacional basados en la intensidad de la escala de grises. A partir del matching de las imágenes, es posible cuantificar el desplazamiento y las deformaciones de campo completo, caracterizando así el comportamiento y la respuesta global de los materiales.

La DIC es una técnica considerada como no invasiva y no destructiva ya que no requiere contacto directo con el material, lo que permite la continua toma de datos, que además son de campo completo. Esta característica supone una de las principales ventajas de la técnica, ya que las mediciones no están condicionadas por los problemas de adherencia o desprendimiento que pueden producirse en otras técnicas de medición convencionales como las galgas extensiométricas.

Además, al estar basada en el procesamiento de imágenes, cuenta con numerosas ventajas ligadas a las amplias capacidades de este tipo de técnicas (Bing Pan, 2018). En primer lugar, la configuración experimental es muy flexible y económica ya que a pesar de que requiere una inversión inicial relativamente elevada, puede ser empleada de manera ilimitada para múltiples ensayos de caracterización. La resolución tanto espacial como temporal puede ser ajustada en función de las necesidades y condiciones ambientales. En este sentido, la técnica puede aplicarse tanto en exteriores como en interiores con la ayuda de luz artificial. Por último, la amplia difusión de las técnicas DIC ha llevado al desarrollo de diversos softwares libres de código abierto (Blaber, Adair, & Antoniou, 2015; Solav, Moerman, Jaeger, Genovese, & Herr, 2018), que permiten la

aplicación de la técnica de una forma mucho más económica frente a los sistemas comerciales, lo que supone una ventaja competitiva ante otros métodos tanto convencionales como ópticos.

La técnica DIC puede ser extendida y aplicada a cualquier tipo de prueba, desde materiales tradicionales y uniformes como el acero (Kang, Ososkov, Embury, & Wilkinson, 2007), materiales compuestos con un marcado comportamiento heterogéneo (García-Martin et al., 2020) o incluso tejidos biológicos (Solav et al., 2018). Además, la flexibilidad de las configuraciones experimentales permiten llevar a cabo análisis desde escalas nanométricas (Berfield et al., 2007) hasta escalas kilométricas (Tian & Pan, 2016).

El principal requisito que han de cumplir las pruebas para la aplicación de las técnicas DIC es la captura de imágenes con variaciones de intensidad suficientes y estables, de manera que puedan establecerse correspondencias únicas entre los puntos de la superficie de los materiales a analizar (Sutton et al., 2009). De esta forma, independientemente de cuál sea el material a analizar o las condiciones de las pruebas, podrán obtenerse los desplazamientos y deformaciones de campo completo, que generalmente se emplean para cuatro propósitos (Bing Pan, 2018): (i) caracterización mecánica; (ii) identificación de parámetros mecánicos; (iii) validación cruzada de predicciones teóricas o modelos FEM y; (iv) control de testeo de materiales.

Debido a esta flexibilidad y amplia aplicabilidad de la técnica, la DIC puede considerarse como una de las herramientas de metrología más importantes actualmente en el ámbito de la mecánica experimental. Sin embargo, se trata de una técnica reciente que a pesar de que comenzó en la década de 1980 (Peters & Ranson, 1982), no tuvo su auge hasta comienzos del siglo XXI.

En las dos últimas décadas del siglo XX tuvo lugar una primera etapa de cimentación y desarrollo teórico de la técnica, en la cual se sentaron las principales bases de los algoritmos DIC. Sin embargo, la falta de precisión y resolución, eficiencia computacional y robustez limitaban su uso, por lo que no era muy extendida. Además, las numerosas fuentes de error y el complejo control de algoritmos más detallados dificultaban la aplicación de esta técnica.

Ya a comienzos del siglo XXI la técnica comenzó a perfeccionarse y popularizarse, sufriendo un importante incremento de publicaciones en las que se empleaba esta metodología a partir del año 2005 (Bing Pan, 2018). Las principales razones de este auge

se fundamentan en la implementación de algoritmos más eficientes, precisos y robustos, que sumados a los desarrollos en sistemas hardware más económicos, permitieron que un gran número de investigadores comenzaran a implementar la DIC en sus estudios. En este sentido, los principales avances en los últimos años se han centrado en la introducción de nuevos sistemas de imagen que permitan caracterizar y corregir los errores causados por los equipos, la mejora de los algoritmos de correlación e interpolación para la obtención de precisiones subpíxel y el análisis y subsanación de los errores de medición.

La DIC fue inicialmente una técnica desarrollada para la medición de desplazamientos y deformaciones en dos dimensiones (2D-DIC). Sin embargo, esta restricción dimensional limita la medición a objetos planos, no pudiendo llevar a cabo mediciones fuera del plano de estudio o en objetos tridimensionales. En este sentido, las técnicas tridimensionales (3D-DIC) adquieren una elevada importancia en la actualidad, mejorando considerablemente la técnica DIC para el análisis de materiales irregulares mediante la incorporación de dos o más cámaras al sistema de adquisición de imágenes. De esta forma, los pares estereoscópicos permiten llevar a cabo la correlación y la reconstrucción de la superficie analizada.

Tabla 1: Enfoque 2D-DIC vs 3D-DIC.

Enfoque		2D-DIC	3D-DIC
Sistema de imagen	Equipamiento	1 cámara	2 o más cámaras
	Posicionamiento	Perpendicular al plano	Ángulo estéreo
Calibración	Interna	Recomendada	Obligatoria
	Externa	No	Obligatoria
Imágenes	Adquisición	Individuales	Pares sincronizados
	Correlación	2D	2D + reconstrucción
Desplazamientos y deformaciones	Dimensiones	X, Y	X, Y, Z

Las principales diferencias entre ambos enfoques se muestran en la Tabla 1, donde destaca como principal ventaja del enfoque 3D-DIC la posibilidad de medición en tres dimensiones, lo que proporciona una mayor aplicabilidad para ensayos de probetas no planas. Teniendo en cuenta estas ventajas y con el fin de profundizar en la integración del enfoque tridimensional, se decidió emplear probetas cilíndricas para los ensayos de hormigón. Así, los desarrollos y flujos de trabajo que a continuación se presentan se referirán al enfoque 3D-DIC.

4.2. Esquema de funcionamiento

La aplicación de la técnica 3D-DIC puede dividirse en tres pasos que han de llevarse a cabo de manera consecutiva (Bing Pan, 2018): (i) preparación de las probetas y generación del patrón de speckle; (ii) adquisición de imágenes o pares estereoscópicos, tanto del espécimen a ensayar como del panel de calibración; y (iii) cálculo de desplazamientos y deformaciones, para lo cual se aplican tanto algoritmos de correlación como de triangulación para la reconstrucción tridimensional.

En la Figura 7 se muestra de manera simplificada el procedimiento de la técnica. En primer lugar, el sistema de imagen conformado por dos cámaras permite la adquisición de pares de imágenes desde diferentes vistas de la probeta. En segundo lugar, un panel de calibración ha de ser capturado en diferentes posiciones para llevar a cabo los procedimientos de calibración y orientación de las cámaras. Posteriormente, durante el ensayo, los pares de imágenes son adquiridos tanto en su estado de referencia como para cada uno de los estados de carga. Por último, el registro de las imágenes permite obtener un campo completo de desplazamientos y deformaciones para una Región de Interés (ROI) en la probeta.

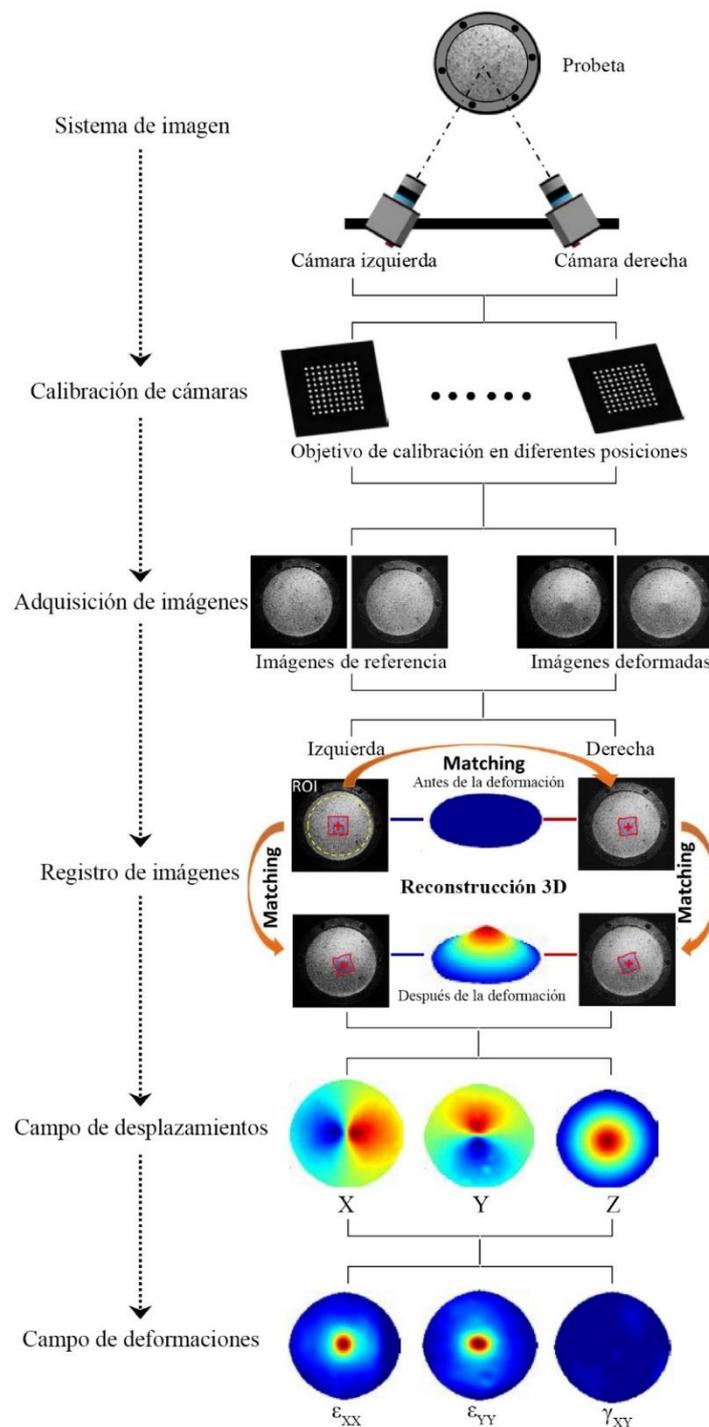


Figura 7: Procedimiento de la técnica 3D-DIC. Fuente: (Bing Pan, 2018).

4.2.1. Preparación de las probetas

La aplicación la técnica DIC requiere la presencia de un patrón de speckle que proporcione variaciones aleatorias de intensidad en la superficie de las muestras. Algunos materiales presentan texturas en su superficie (Figura 8a) cuya variación de intensidad permite la aplicación de la DIC de forma directa (patrón de speckle natural). Sin embargo,

en la mayoría de casos estas variaciones son insuficientes o las texturas son lisas, requiriendo la aplicación de un patrón de speckle artificial en la superficie (Figura 8b y 8c).

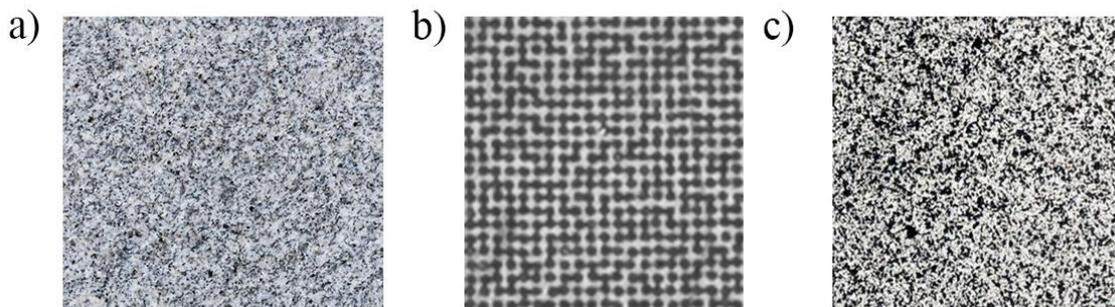


Figura 8: Patrones de speckle. a) Patrón natural (granito); b) Patrón artificial diseñado por computadora; y c) Patrón artificial aplicado con aerosol. Fuente: Elaboración propia.

Existen diferentes técnicas que permiten aplicar patrones de speckle artificiales en función de las necesidades de escala o la forma de los materiales (Dong & Pan, 2017). Los patrones diseñados y aplicados mediante plantillas o tóner transfer (Figura 8b) permiten una mayor optimización y control del proceso, aunque requieren mayor tiempo y condiciones de secado, lo que dificulta su empleo en probetas de hormigón debido a la elevada humedad durante el proceso de curado. Otras técnicas como la inyección de polvo de tóner o la litografía permiten generar patrones speckle para escalas muy reducidas. Sin embargo, la técnica más extendida es la aplicación mediante aerosol.

La técnica de aerosol permite crear patrones de speckle con motas de tamaño milimétrico o submilimétrico (Figura 8c) en la superficie de los especímenes (Sutton et al., 2009). El procedimiento para obtener este patrón consiste en los siguientes pasos: (i) aplicación de una pintura blanca a la superficie del espécimen; y (ii) sobre la superficie blanca se aplica un aerosol de pintura negra.

Con el fin de garantizar la precisión y calidad de los datos obtenidos mediante la técnica DIC, los patrones de speckle han de cumplir los siguientes requisitos (Reu, 2014a, 2014b, 2015a, 2015b, 2015c): (i) alto contraste con diferentes intensidades de escalas de grises y elevados gradientes de intensidad; (ii) aleatoriedad, no periodicidad y no repetitividad; (iii) isotropía, es decir, no ha de existir una direccionalidad obvia; y (iv) estabilidad, de forma que el patrón esté adherido firmemente a la superficie y se deforme junto con éste.

Estos requisitos pueden ser evaluados de manera cuantitativa empleando para ello el parámetro global MIG (Mean Intensity Gradient) (Bing Pan, Lu, & Xie, 2010), derivado del parámetro local SSSIG (Sum of Square of Subset Intensity Gradient). Este último permite evaluar la calidad de un patrón de speckle local dentro de subconjuntos individuales, mientras que el primero es empleado para evaluar la superficie completa.

El parámetro MIG puede ser calculado mediante la Ecuación 1, de manera que los valores más altos indican que la distribución de grises es adecuada.

$$MIG = \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H \frac{|\nabla f(x_{ij})|}{W*H} \quad (1)$$

Donde $|\nabla f(x_{ij})|$ es el vector local de intensidad gradiente de una imagen de escala de grises, W es la anchura de la región de interés (ROI) y H es la altura de la ROI.

4.2.2. Orientación de las cámaras

Junto con los algoritmos de correlación, el enfoque 3D-DIC requiere del posicionamiento de las cámaras para poder llevar a cabo la reconstrucción de los pares de imágenes. Este posicionamiento u orientación de las cámaras generalmente emplea los principios fotogramétricos de triangulación y Ajuste de Haces (BA) (Mikhail, Bethel, & McGlone, 2001). No obstante, existen otra serie de paquetes 3D-DIC que integran algoritmos como el Direct Linear Transformation (DLT) para facilitar la calibración estéreo, simplificando así el procedimiento para los enfoques de múltiples vistas. Este es el caso del algoritmo desarrollado por Solav et al. (Solav et al., 2018) mediante la caja de herramientas de MATLAB de código abierto denominada MultiDIC. Se trata de una toolbox que integra el robusto software DIC bidimensional Ncorr (Blaber et al., 2015) basado en subconjuntos con procedimientos de calibración BA y DLT.

El algoritmo BA es utilizado para obtener los parámetros de distorsión y sesgo de cada una de las cámaras de manera individual, mientras que el algoritmo DLT permite obtener los parámetros internos una vez eliminada la distorsión, así como los parámetros externos de los pares de cámaras. Además, el algoritmo DLT permite establecer un sistema de coordenadas global asociado al objeto de calibración 3D y que es común para todos los pares de cámaras, ya que es posible la implementación de múltiples vistas fusionando mallas de diferentes pares estéreo para calcular y visualizar formas en 3D y movimiento de campo completo.

Uno de los aspectos más destacados a la hora de obtener una calibración y una correlación exitosa es la configuración del ángulo estéreo formado por los ejes principales de las cámaras que capturan cada par de imágenes. En este sentido, un ángulo demasiado alto permite una mejor precisión en profundidad, pero una menor precisión en el plano, y un ángulo demasiado pequeño permitirá una mejor precisión en el plano a costa de una mayor incertidumbre en profundidad (Ke, Schreier, Sutton, & Wang, 2011). De manera general, un ángulo entre 15°-35° es recomendado para la mayoría de los casos (Byrne, 2016). No obstante, para lentes con una distancia focal elevada (>35mm) puede emplearse un ángulo inferior de hasta 10° debido a los problemas de profundidad de campo que pueden presentar este tipo de lentes.

4.2.2.1. Calibración

El primer paso consiste en el cálculo de los parámetros intrínsecos de cada una de las cámaras de manera que la distorsión y el sesgo de la lente puedan ser corregidos. Para ello, el algoritmo BA (Triggs, McLauchlan, Hartley, & Fitzgibbon, 1999) permite obtener los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara mediante observaciones repetitivas de puntos dispersos en diferentes direcciones de visualización. El empleo de un panel de calibración plano permite la detección de los puntos con una distancia conocida, calculando tanto la posición de las cámaras como los parámetros de distorsión de las lentes. Estos parámetros generalmente son utilizados para obtener las coordenadas del punto imagen en el sistema de coordenadas del sensor de acuerdo con la Ecuación 2. No obstante, en este caso únicamente se utilizará el parámetro de sesgo $s = f_y \cdot \operatorname{tg} \alpha$, siendo α el ángulo entre los ejes vertical y horizontal del sensor (0 si son perpendiculares).

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde f_x, f_y son las distancias focales en píxeles; C_x, C_y son las coordenadas del punto principal o centro óptico; y s es el coeficiente de sesgo.

Además el algoritmo BA permite corregir la distorsión de la lente, empleando para ello un modelo de distorsión no lineal y reemplazando las coordenadas idealizadas por las corregidas de acuerdo a la ecuación 3.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde $r^2 = x^2 + y^2$; k_1, k_2, k_3 son los parámetros de distorsión radial; y p_1, p_2 son los parámetros de distorsión tangencial.

El algoritmo BA se encuentra implementado en MATLAB en la Caja de herramientas de calibración de la cámara (Simulink, 2018). El software MultiDIC implementa esta caja de herramientas, de manera que la calibración ha de realizarse directamente en el software y de manera individual para cada una de las cámaras. Para ello, es necesario capturar un conjunto de imágenes -generalmente entre 50 y 100 (Reu, 2013)- de un objetivo de calibración plano de manera que diferentes posiciones y orientaciones sean capturadas en todo el FOV. Posteriormente, el algoritmo BA minimiza los errores generales de reproyección de los puntos, calculando así los parámetros mencionados anteriormente.

4.2.2.2. Orientación externa

El segundo paso consiste en la aplicación de la DLT (Abbel-Aziz, 1971) de manera que pueda establecerse una relación entre las coordenadas imagen (X,Y) y las coordenadas objeto (X', Y', Z'). La DLT permite representar mediante una solución lineal de 11 parámetros matemáticos el modelo no lineal de 9 parámetros geométricos: tres para la orientación interna y seis para la orientación externa. Dado que cada punto permite obtener dos ecuaciones (Ecuación 4), es necesario un mínimo de seis puntos con las coordenadas conocidas para obtener la solución de los 11 parámetros. No obstante, un mayor número de puntos permitirá resolver un sistema sobredimensionado y minimizar así los errores.

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{L_1X+L_2Y+L_3Z+L_4}{L_9X+L_{10}Y+L_{11}Z+1} \\ y_p &= \frac{L_5X+L_6Y+L_7Z+L_8}{L_9X+L_{10}Y+L_{11}Z+1} \end{aligned} \quad (4)$$

Donde $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9, L_{10}, L_{11}$ corresponden a los 11 parámetros no físicos de la DLT.

Para poder resolver la ecuación 4 es necesario capturar una imagen de un objeto de calibración no plano, en el que existan puntos de control con sus coordenadas 3D conocidas. El empleo de un objeto cilíndrico facilita en este caso la captura las imágenes desde diferentes pares estéreo, así como la generación de un sistema de coordenadas global en el que el eje Z se corresponde con el eje vertical del cilindro. De esta forma, en

caso de que exista más de un par estéreo, es posible unificar todas las imágenes bajo un mismo sistema de coordenadas.

4.2.3. Cálculo de desplazamientos y deformaciones

Los algoritmos de orientación de las cámaras permiten obtener los parámetros necesarios para llevar a cabo la reconstrucción de los pares de imágenes de manera independiente. Sin embargo, es necesario llevar a cabo un proceso de registro de imágenes en el que los algoritmos de correlación permitan realizar el matching de las imágenes y la correspondencia de puntos entre ellas. Para ello, cada una de las imágenes del par estereoscópico es considerada como una matriz con un valor numérico de escala de grises. Mediante los algoritmos de correlación, los puntos son rastreados y reconocidos en el resto de imágenes, pudiendo realizar su seguimiento y obteniendo así su posición y desplazamiento.

Mientras que en el enfoque 2D-DIC las imágenes son rastreadas de manera individual, en el enfoque 3D-DIC la correlación es realizada entre las imágenes izquierda y derecha, así como entre las imágenes de referencia y sus correspondientes deformadas tal y como se muestra en la Figura 9. De esta forma, cada uno de los puntos buscados en la imagen de referencia izquierda es asociado a un punto en la imagen de referencia derecha, obteniendo posteriormente una nube de puntos tridimensional mediante reconstrucción 3D. A su vez, los algoritmos DIC permiten realizar el seguimiento en cada una de las imágenes deformadas con respecto a la imagen de referencia, determinando así la nueva posición para cada punto en los diferentes estados.

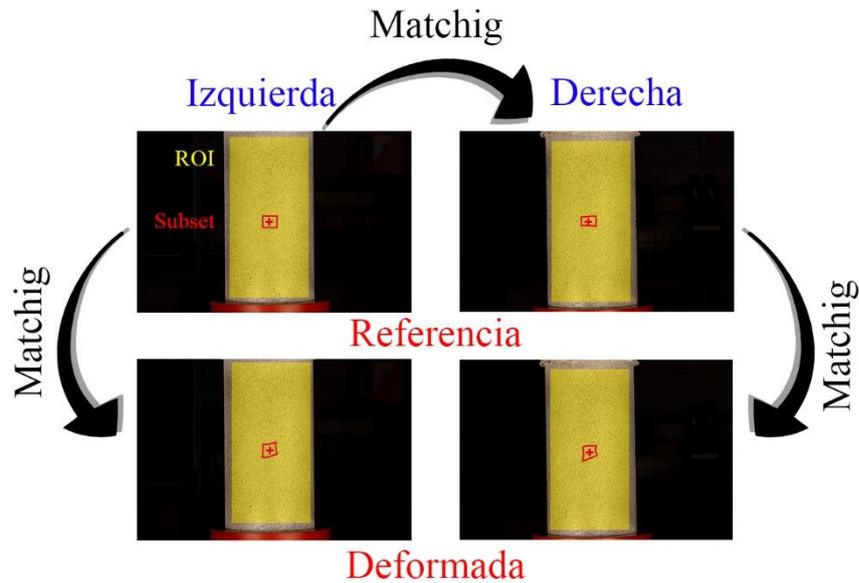


Figura 9: Matching de puntos en las imágenes mediante 3D-DIC. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1. Algoritmos DIC

Para llevar a cabo el procedimiento de matching entre las diferentes imágenes, es necesario dividir la Región de Interés (ROI) en una cuadrícula conformada por subconjuntos de píxeles denominados subset. Estos subconjuntos son empleados para realizar el seguimiento de su localización en la imagen deformada (Figura 10a), evaluando el grado de similitud entre el subconjunto de referencia y el subconjunto deformado. Durante esta evaluación, son asumidos los grados de libertad que se muestran en la Figura 10b para el análisis de los desplazamientos.

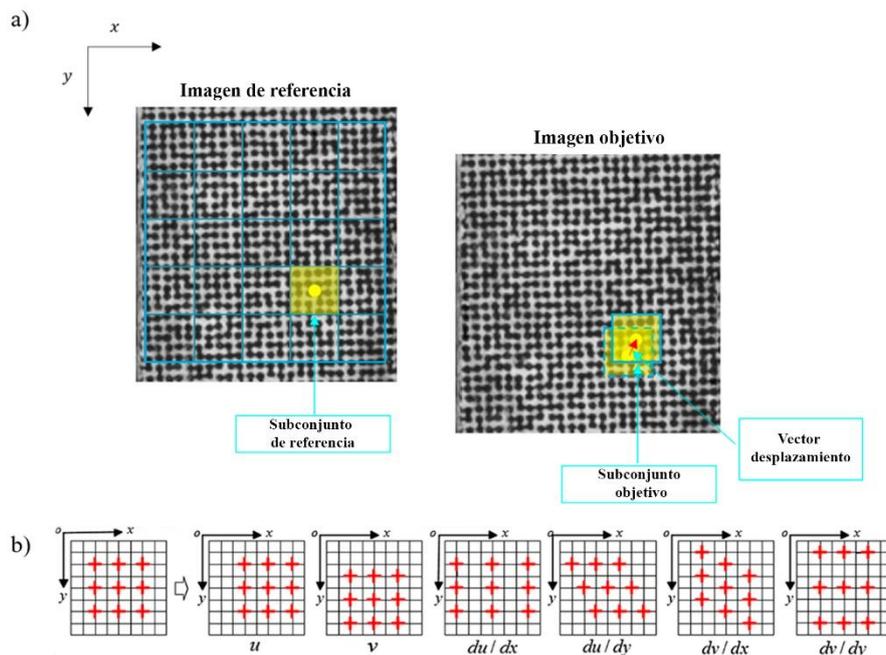


Figura 10: Representación gráfica del método DIC: a) Evaluación del desplazamiento generado por un subconjunto; b) Grados de libertad asumidos durante el análisis de los desplazamientos. u y v representa la translación del subconjunto en las direcciones x e y . du/dy y dv/dx representan la deformación cortante del subconjunto en las direcciones x e y . Fuente: (García-Martin et al., 2020)

El grado de similitud entre el subconjunto de la imagen de referencia y la imagen deformada es evaluado mediante el criterio de correlación Zero mean Normalized Cross-Correlation (ZNCC) (Bing Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009). Se trata de un criterio insensible a los cambios de escala y desplazamiento de la intensidad del subconjunto deformado al sustraer los valores medios de intensidad (Ecuación 5). El índice C_{ZNCC} indica una buena coincidencia cuando está cerca de 0.

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum \bar{f}_i \bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2 \sum \bar{g}_i^2}} \quad (5)$$

Donde $\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$ $\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i$ $\bar{f}_i = f_i - \bar{f}$ $\bar{g}_i = g_i - \bar{g}$
 con f_i, g_i representando el valor de intensidad del i^{th} punto de pixel dentro del subconjunto de referencia y el subconjunto deformado.

De forma complementaria y con el objetivo de obtener una precisión subpíxel, se emplea una estrategia de refinamiento (Blaber et al., 2015) que combina: (i) un esquema de interpolación b-spline b-cuántico para pasar de los valores discretos de las imágenes (0–255) a un espacio continuo (Luu, Wang, Vo, Hoang, & Ma, 2011); y (ii) el método de Composición Inversa de Gauss-Newton (IC-GN) para la minimización de la función de

coste que relaciona el subconjunto de referencia con el deformado (B. Pan, Li, & Tong, 2013).

En cuanto al proceso de seguimiento para cada subconjunto, uno de los métodos más utilizados es el RG-DIC (Reliability-Guided Digital Image Correlation) (Bing Pan, 2009). Este método parte de un punto inicial o semilla y procesa el resto de subconjuntos siguiendo un algoritmo que permite la minimización de los errores. Para ello, se calculan los parámetros de deformación y el valor C_{LS} (least square correlation error) correspondientes al punto inicial (Figura 11) empleando la función NCC (normalized cross-correlation), sift u otros métodos globales para obtener una estimación inicial. Los valores C_{LS} se almacenan en una cola (queue) junto con los parámetros de deformación y la localización del centro del subconjunto de referencia (X_{refc} , Y_{refc}).

A partir de los resultados obtenidos para el cálculo del primer subconjunto, el resto usará como estimación inicial la información del subconjunto precedente. A continuación se procesará el subconjunto correspondiente al mínimo valor de C_{LS} , omitiendo su información de la cola y añadiendo los valores estimados correspondientes a los subconjuntos próximos.

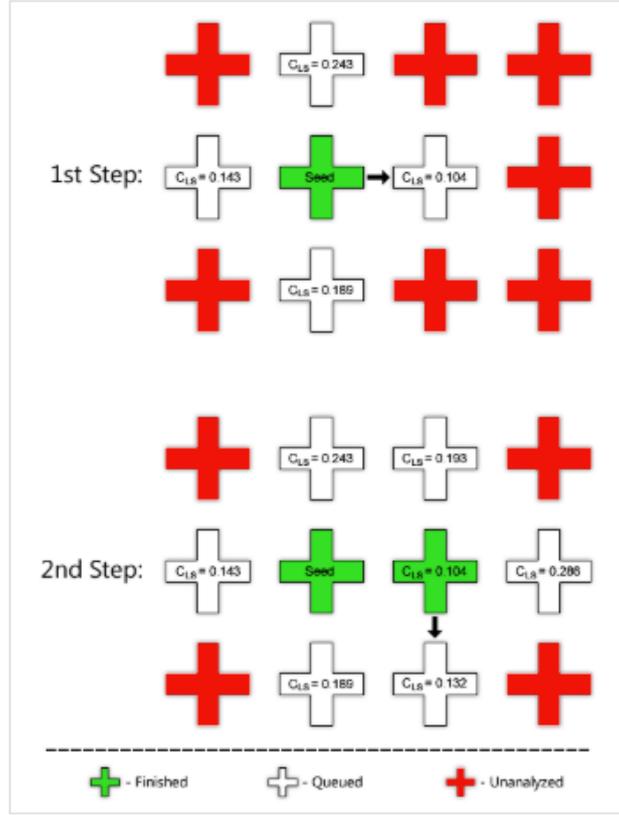


Figura 11: Workflow algoritmo RG-DIC. Fuente: (Blaber et al., 2015).

4.2.3.2. Reconstrucción 3D

Una vez se ha realizado la correlación de los pares de imágenes, es posible realizar la reconstrucción tridimensional de los puntos correspondientes en cada una de las imágenes, obteniendo así una nube de puntos que se corresponderá con los centros de los subconjuntos de la ROI definida. Para llevar a cabo esta reconstrucción se emplearán los parámetros DLT correspondientes a cada una de las cámaras (C^R y C^L) obtenidos a partir de la orientación externa, así como las coordenadas imagen de los puntos coincidentes obtenidas a partir de la DIC. Las coordenadas de los puntos se obtendrán para cada uno de ellos de acuerdo a la Ecuación 6.

$$P = [A^T A]^{-1} A^T U \quad (6)$$

Donde

$$A = \begin{bmatrix} L_1^{CR} - L_9^{CR} x_p^{CR} & L_2^{CR} - L_{10}^{CR} x_p^{CR} & L_3^{CR} - L_{11}^{CR} x_p^{CR} \\ L_5^{CR} - L_9^{CR} y_p^{CR} & L_6^{CR} - L_{10}^{CR} y_p^{CR} & L_7^{CR} - L_{11}^{CR} y_p^{CR} \\ L_1^{CL} - L_9^{CL} x_p^{CL} & sL_2^{CL} - L_{10}^{CL} x_p^{CL} & L_3^{CL} - L_{11}^{CL} x_p^{CL} \\ L_5^{CL} - L_9^{CL} y_p^{CL} & L_6^{CL} - L_{10}^{CL} y_p^{CL} & L_7^{CL} - L_{11}^{CL} y_p^{CL} \end{bmatrix};$$

$$P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} x_p^{C_R} - L_4^{C_R} \\ y_p^{C_R} - L_8^{C_R} \\ x_p^{C_L} - L_4^{C_L} \\ y_p^{C_L} - L_8^{C_L} \end{bmatrix}.$$

Dado que la orientación externa se realiza con un objeto de calibración con coordenadas 3D conocidas, las coordenadas X, Y, Z calculadas a partir de la Ecuación 6 se obtienen en el sistema de coordenadas global, sin necesidad de realizar ninguna transformación dimensional. Además, es posible calcular el error en la reconstrucción de las coordenadas de los puntos gracias a las coordenadas reales de los puntos de control del objeto de calibración. De esta forma, la Ecuación 7 permite obtener el error medio, mientras que la Ecuación 8 permite obtener el error mínimo cuadrático (RMS).

$$\varepsilon_M = \frac{1}{N} \sqrt{(\sum_{n=1}^N \Delta X_n)^2 + (\sum_{n=1}^N \Delta Y_n)^2 + (\sum_{n=1}^N \Delta Z_n)^2}; (7)$$

$$\varepsilon_R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Delta X_n)^2 + (\Delta Y_n)^2 + (\Delta Z_n)^2} \quad (8)$$

Donde N es el número de puntos de control correspondientes al objeto de calibración y los errores de cada punto son:

$$\Delta X_n = X_n - X_n^R, \quad \Delta Y_n = Y_n - Y_n^R, \quad \Delta Z_n = Z_n - Z_n^R.$$

Siendo X_n^R, Y_n^R, Z_n^R las coordenadas reales de cada punto.

Una vez se han obtenido las coordenadas tridimensionales de los puntos homólogos para toda la ROI, éstas son utilizadas para calcular los desplazamientos. De esta forma, es posible obtener un campo completo de desplazamientos para cada uno de los pares estereoscópicos.

5. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

5.1. Dosificación empleada

En esta investigación se ha trabajado con el reemplazo de la totalidad de los áridos naturales por áridos reciclados, tanto áridos gruesos como áridos finos. En ninguno de los casos se ha realizado tratamiento de los residuos empleados como áridos ni selección granulométrica de los mismos. De esta forma, los costes de fabricación del hormigón reciclado se reducen notablemente al no requerirse extracción de áridos y emplearse los RCD sin ningún tratamiento previo. Respecto a la tipología y procedencia de los áridos, se han empleado dos tipos diferentes relativos a residuos cerámicos y a residuos de hormigón.

La dosificación empleada (Tabla 1) ha sido similar para los dos tipos de hormigón fabricados, modificando únicamente la tipología de los áridos, que se han considerado como todo-uno debido a la no selección granulométrica. Respecto al cemento empleado, se utilizó el tipo CEM II/ A-P 42,5 R. Además, se ha empleado un superplastificante del tipo Glenium SKY 549.

Tabla 2: Dosificación amasada hormigón 40l.

Material	Cantidad
Todo-uno (kg)	80
CEM II/ A-P 42,5 R (Kg)	9
Glenium SKY 549 (l)	0.20
AGUA (l)	6

Como resultado se obtuvieron dos tipos de hormigones reciclados a los que se les denominó ZH y ZC, cuya identificación se corresponde con residuos de hormigón y residuos cerámicos respectivamente.

5.2. Caracterización del hormigón

Con el fin de adecuar los resultados del estudio a la normativa actual (Concrete Permanent, 2008) se plantean una serie de ensayos a llevar a cabo sobre el hormigón endurecido, los cuales están destinados a identificar sus propiedades mecánicas. Además en el marco de la investigación se llevaron a cabo otra serie de ensayos sobre los áridos empleados para la fabricación del hormigón, así como sobre el hormigón fresco que permitieron conocer las características del material constitutivo y del producto tras finalizar el proceso de amasado y previo al fraguado. No obstante, este tipo de ensayos no son relevantes en el ámbito de este trabajo al no estar relacionados con la aplicación de la técnica 3D-DIC.

Para llevar a cabo los ensayos sobre el hormigón endurecido se fabricaron probetas de forma cilíndrica (Figura 12) con un diámetro de 150 mm y una altura de 300 mm de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-1 "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de probetas y moldes*" (AENOR, 2014a). Su fabricación se realizó de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-2 "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*" (AENOR, 2009), al igual que su curado, de manera que una vez elaboradas se mantuvieron en cámara húmeda a una temperatura de 22 ± 2 °C, siendo desmoldadas pasadas 24h y mantenidas nuevamente en cámara húmeda hasta ser ensayadas.

Previo a la realización de los ensayos, las probetas fueron refrentadas con mortero de azufre (Figura 12) con el fin de obtener una superficie totalmente plana que permita el reparto uniforme de la carga, así como el paralelismo entre las caras y su ortogonalidad con respecto a las generatrices del cilindro.

Las soluciones de hormigón fueron evaluadas mediante ensayos de compresión de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-3 "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*" (AENOR, 2020).



Figura 12: Probetas fabricadas de hormigón reciclado con refrentado de azufre. Fuente: Elaboración propia.

5.3. Prototipo de adquisición de datos

Los ensayos de compresión se llevaron a cabo con una máquina de compresión electromecánica Servosis ME-405/50/5 cuyas especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 3: Especificaciones técnicas Servosis ME-405/50/5.

Maximum Load	500 kN
Load Cell	REP Transducer Type TC4 50kN
Grip	MTS Model XSA304A

Con el fin de capturar los desplazamientos y las deformaciones sufridas por las soluciones de hormigón durante las pruebas de compresión, se utilizó un enfoque 3D-DIC. La adquisición de estas imágenes se realizó mediante un prototipo DIC (Figura 13) desarrollado en el transcurso de la investigación de forma conjunta con el alumno Javier Pisonero Carabias. El prototipo está compuesto por: (i) dos cámaras digitales réflex de alta resolución correspondientes al modelo Canon EOS 700D con una lente macro Canon

de 60 mm cuyas características se muestran en la Tabla 3; (ii) un controlador lógico programable (PLC); y (iii) dos unidades de iluminación LED de luz neutra.

Tabla 4: Especificaciones técnicas cámara digital Canon EOS 700D y sistema de lentes macro empleado.

Sensor type	CMOS APS-C
Sensor size	22.3 x 14.9 mm ²
Crop factor	1.61
Pixel size	4.3 μm
Image size	5184 × 3456 px
Total pixels	18.5 Mpx
Focal length	60 mm
Closer focused distance	254 mm
Lens magnification	1:1 (life size)
Dimensions	133.1 × 99.8 × 78.8 mm

La sincronización de ambas cámaras se realizó mediante un PLC que permitió la programación de los disparos simultáneos. A su vez, éste se conectó a una plataforma de adquisición de datos Quantum (Figura 13b y 13c) de manera que las imágenes capturadas fueron asociadas a los datos de la célula de carga.

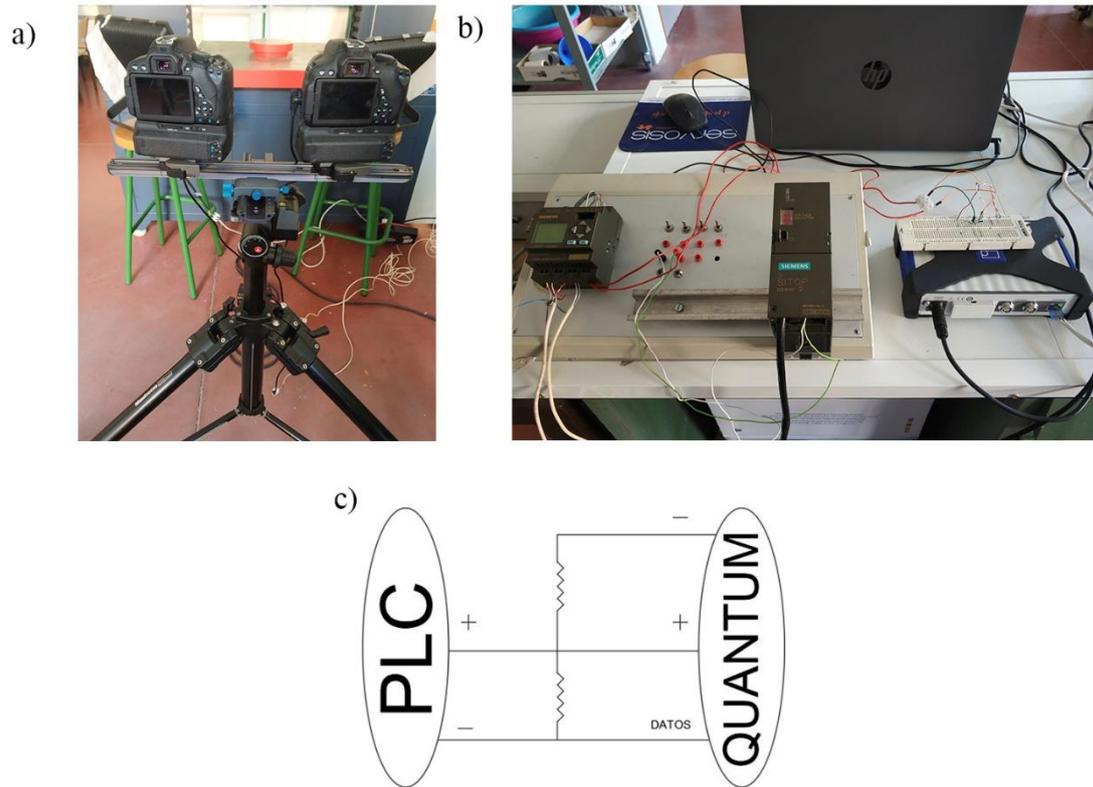


Figura 13: Prototipo de adquisición de datos. a) Plataforma de cámaras y unidades de iluminación; b) Conexiones PLC y Quantum; c) Esquema unifilar conexiones. Fuente: Elaboración propia

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Configuración del ensayo

Un total de 8 ensayos fueron llevados a cabo de acuerdo a la normativa UNE-EN 12390-3 (AENOR, 2020), cuatro de los cuales se corresponden a la dosificación ZH mientras que los otros cuatro se corresponden a la ZC. Los ensayos se llevaron a cabo para un tiempo de curado de 7 y 28 días, de manera que las probetas ZH-1, ZH-2, ZC-1 y ZC-2 se ensayaron pasados 7 días de su fabricación mientras que las probetas ZH-3, ZH-4, ZC-3 y ZC-4 se ensayaron a los 28 días.

Con el fin de optimizar la configuración para emplear la técnica 3D-DIC, se llevó a cabo la preparación previa a los ensayos definida en la Sección 4.2.1 tanto en las probetas a ensayar como en la configuración del prototipo de adquisición. Los pasos seguidos en este proceso fueron los siguientes: (i) aplicación del patrón speckle; (ii) definición del Ground Sampling Distance (GSD), la apertura de la lente y el ángulo estéreo; y (iii) calibración geométrica y orientación de las cámaras.

En primer lugar, para obtener el patrón speckle, se aplicó una imprimación blanca mate a las probetas, para posteriormente generar mediante spray negro mate un patrón irregular de puntos (Figura 14). La calidad del patrón fue posteriormente analizada, obteniendo un factor de cobertura (Tabla 4) dentro del rango óptimo del 40-70% establecido por Lecompte et. Al (Lecompte, Sol, Vantomme, & Habraken, 2006) y un valor promedio del MIG comprendido entre 30-35, considerándose también aceptable según los valores propuestos por Pan et. al (Bing Pan et al., 2010).

Tabla 5: MIG y factor de cobertura de las probetas ensayadas.

Probeta	MIG	Cobertura (%)
ZH-1	32	45
ZH-2	35	49
ZH-3	32	49
ZH-4	29	48
ZC-1	33	45
ZC-2	34	47
ZC-3	34	46
ZC-4	35	48

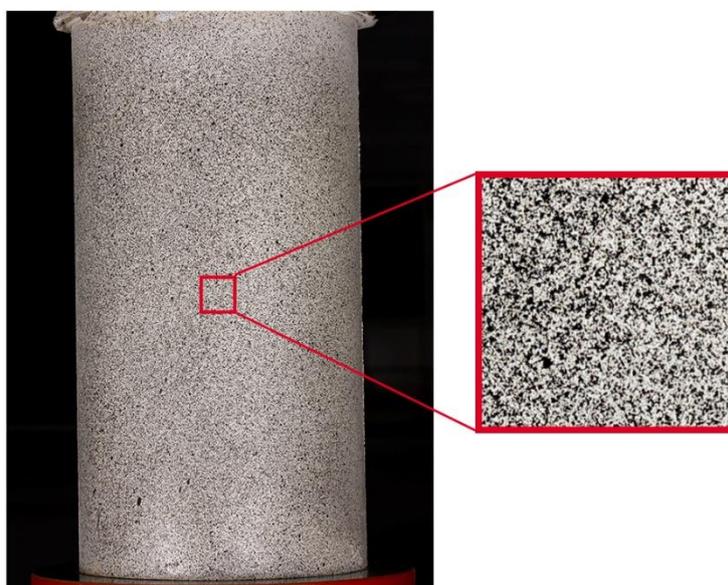


Figura 14: Detalle del patrón de speckle generado. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la configuración del prototipo de adquisición de datos (Figura 15), la velocidad de carga fue configurada a 0.4 MPa y la captura de imágenes se definió cada 1.5 segundos, es decir, una imagen cada 0.6 MPa.

El prototipo de captura de imágenes fue colocado a 1.25m de la probeta de ensayo (Figura 15), de manera que el valor de GSD obtenido para cada una de las cámaras fue de 0.09 mm/px. Se empleó una velocidad de disparo de 1/100 s y una apertura de lente de 1/10, obteniendo un Depth of Field (DoF) de 180 mm, que fue considerado suficiente dado que el diámetro de las probetas cilíndricas fue de 150 mm. Con el fin de evitar los problemas de profundidad de campo de lentes de distancia focal elevada como es el caso, se configuró un ángulo estéreo de 10° (Byrne, 2016).



Figura 15: Configuración del prototipo empleado para 3D-DIC. Fuente: Elaboración propia.

6.2. Orientación de las cámaras

Teniendo en cuenta que los ensayos fueron realizados en días diferentes, fue necesario llevar a cabo el procedimiento de orientación de las cámaras de manera independiente para cada uno de los días.

Para llevar a cabo la calibración geométrica y la corrección de la distorsión de las lentes se empleó un objetivo de calibración plano del tipo tablero de ajedrez (Figura 15) conformado por una matriz de 18x29 cuadrados de 10 mm. La orientación externa fue llevada a cabo aplicando el procedimiento DLT, para lo cual se empleó un objeto cilíndrico (Figura 16) con puntos de control correspondientes a una matriz de 18x25 con un espaciado de 10 mm. El diámetro del objeto es de 125mm, de manera que fue posible obtener las coordenadas tridimensionales reales correspondientes a cada uno de los puntos de control, que fueron posteriormente empleados para el cálculo del error.



Figura 16: Objeto de calibración cilíndrico. Fuente: Elaboración propia.

6.2.1. Orientación ensayos a 7 días

Para llevar a cabo la calibración interna de las cámaras, un total de 126 imágenes correspondientes al objeto plano en diferentes posiciones fueron capturadas de forma simultánea en ambas cámaras. 35 y 33 de estas imágenes fueron descartadas de la cámara izquierda y derecha respectivamente, debido a su elevado error de reproyección o a que no fue posible detectar todos los puntos de control de la placa de calibración.

Los parámetros intrínsecos de ambas cámaras (Tabla 5 y 6) fueron calculados antes y después de la corrección de la distorsión. De igual forma, se obtuvieron los errores de reproyección de los puntos de control (Figura 17 y 18), obteniendo finalmente un error medio general de 0.15 px en ambas cámaras.

Tabla 6: Parámetros intrínsecos cámara izquierda para ensayos a 7 días. Unit* Pixel; Unit** °.

Parámetro	Antes corrección	Después corrección
F_X^*	15069±0.62	15069±0.62
F_Y^*	15075±0.61	15075±0.61
P_X^*	2676.3±0.73	2678.3±0.73
P_Y^*	1841.5±0.52	1841.6±0.52
K_1	-0.0936±0.0006	2.2e-5±0.0006
K_2	0.8236±0.0468	7.2e-5±0.0467

K₃	4.143±0.979	0.034±0.979
P₁	0.0012±9.9e-6	2.0e-6±1.2e-5
P₂	-2.6e-5±1.4e-5	4.6e-5±1.7e-5
s^{**}	-0.00025±3.5e-6	-0.00025±3.5e-6

Tabla 7: Parámetros intrínsecos cámara derecha para ensayos a 7 días. Unit* Pixel; Unit** °.

Parámetro	Antes corrección	Después corrección
F_X*	15031±0.61	15031±0.61
F_Y*	15037±0.61	15037±0.61
P_X*	2549.8±0.68	2545.7±0.68
P_Y*	1771.5±0.51	1771.6±0.51
K₁	-0.0830±0.0006	1.9e-5±0.0006
K₂	0.7231±0.0482	0.0075±0.0482
K₃	7.537±1.032	-0.182±1.032
P₁	6.2e-5±9.9e-6	9.6e-7±1.5e-5
P₂	-0.0011±1.3e-5	-9.0e-5±1.6e-5
s^{**}	-0.00023±2.2e-6	-0.00023±2.2e-6

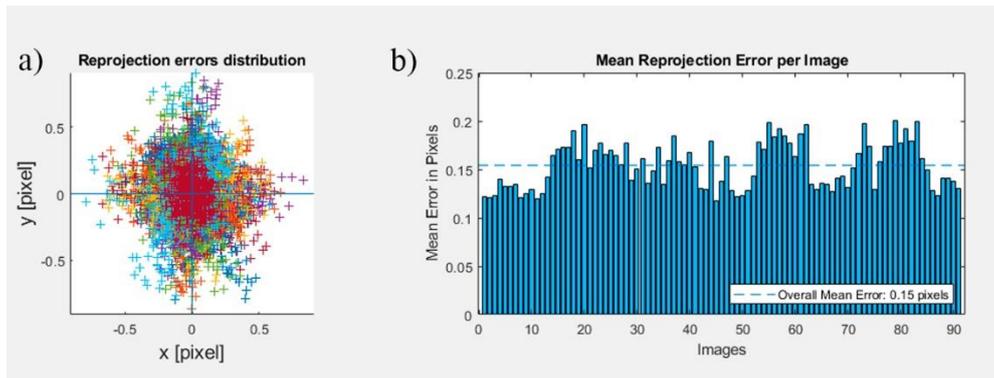


Figura 17: Errores de reproyección calibración interna cámara izquierda para ensayos a 7 días. a) Distribución de los errores de reproyección de los puntos; b) Error de reproyección medio por imagen. Fuente: Elaboración propia.

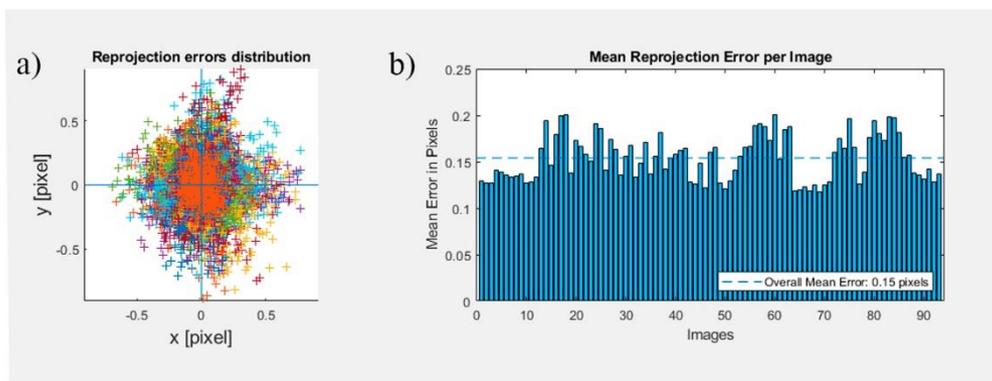


Figura 18: Errores de reproyección calibración interna cámara derecha para ensayos a 7 días. a) Distribución de los errores de reproyección de los puntos; b) Error de reproyección medio por imagen. Fuente: Elaboración propia.

Para llevar a cabo el proceso de orientación externa, se capturó una imagen simultánea desde ambas cámaras del objeto de calibración cilíndrico (Figura 16). Los puntos detectados en la imagen de cada una de las cámaras fueron utilizados para la obtención de los parámetros DLT (Tabla 7) mediante la Ecuación 4, de manera que los pares de imágenes capturados por ambas cámaras pueden ser reconstruidos tridimensionalmente de acuerdo a dichos parámetros. Además, los puntos detectados en las imágenes de calibración fueron reproyectados (Figura 19) con el fin de analizar el error obtenido en la reconstrucción, obteniendo un error medio de 0.0145 mm y un RMSE de 0.179 mm. Tal y como se muestra en la Figura 19c, el mayor error viene dado en el eje y, que se corresponde con el eje perpendicular al plano de la lente.

Tabla 8: Parámetros DLT de las cámaras para ensayos a 7 días.

Parámetro	Cámara Izquierda	Cámara Derecha
L1	-11,3959311519753	-10,9962700128538
L2	-1.15584	-3.0036
L3	-0.0670	-0.11478
L4	2550.9085	2548.6383
L5	-0.00092	0.3371
L6	-1.5262	-1.6368
L7	-11.2833	-11.2357
L8	2964.1275	3074.1406
L9	-4.99e-05	7.82e-05
L10	-0.00074	-0.00077
L11	9.02e-06	1.80e-05

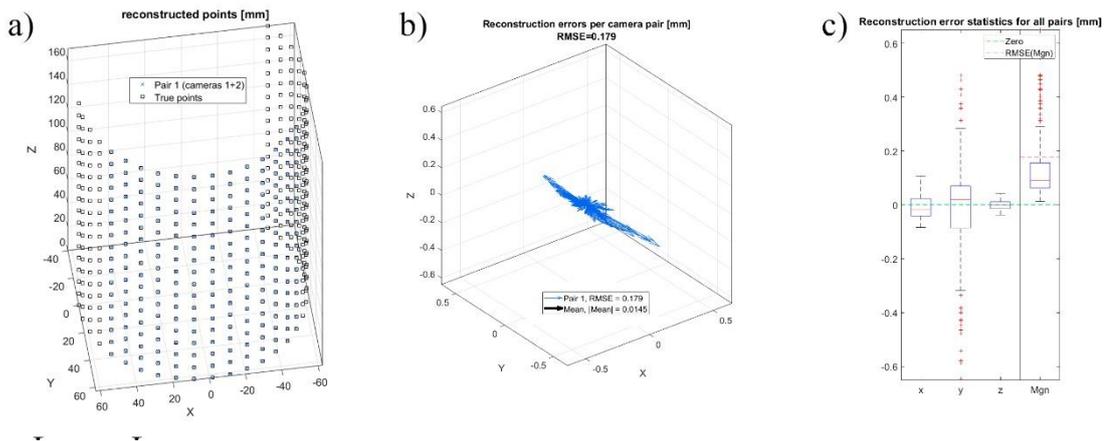


Figura 19: Reconstrucción 3D mediante DLT para ensayos a 7 días. a) Puntos reconstruidos y puntos verdaderos; b) Dirección de errores de reconstrucción; c) Errores de reconstrucción en cada eje. Fuente: Elaboración propia.

6.2.2. Orientación ensayos a 28 días

El procedimiento para llevar a cabo la orientación de las cámaras fue similar, repitiendo el mismo protocolo. En este caso, un total de 108 imágenes correspondientes al objeto plano en diferentes posiciones fueron capturadas de forma simultánea en ambas cámaras. 48 y 40 de estas imágenes fueron descartadas de la cámara izquierda y derecha respectivamente, debido a su elevado error de reproyección o a que no fue posible detectar todos los puntos de control de la placa de calibración.

Los parámetros intrínsecos de ambas cámaras (Tabla 8 y 9) fueron calculados antes y después de la corrección de la distorsión. De igual forma, se obtuvieron los errores de reproyección de los puntos de control (Figura 20 y 21), obteniendo finalmente un error medio general de 0.15 px en la cámara izquierda y 0.16 px en la cámara derecha.

Tabla 9: Parámetros intrínsecos cámara izquierda para ensayos a 28 días. Unit* Pixel; Unit** °.

Parámetro	Antes corrección	Después corrección
F_X^*	15120±0.75	15120±0.75
F_Y^*	15127±0.75	15127±0.75
P_X^*	2677.4±0.79	2679.0±0.79
P_Y^*	1815.2±0.53	1815.1±0.53
K_1	-0.0931±0.0007	8.9e-6±0.0007
K_2	0.7355±0.0522	0.0011±0.0522

K₃	7.919±1.127	-0.0161±1.125
P₁	0.0010±1.0e-5	-8.3e-7±1.2e-5
P₂	-0.0002±1.5e-5	3.3e-5±1.8e-5
s**	-0.00026±2.9e-6	-0.00026±2.9e-6

Tabla 10: Parámetros intrínsecos cámara derecha para ensayos a 28 días. Unit* Pixel; Unit** °.

Parámetro	Antes corrección	Después corrección
F_X*	15052±0.69	15053±0.69
F_Y*	15059±0.69	15060±0.69
P_X*	2559.1±0.75	2554.7±0.7
P_Y*	1760.7±0.52	1760.6±0.52
K₁	-0.0865±0.0007	0.0001±0.0007
K₂	0.6532±0.0525	0.0004±0.0524
K₃	5.366±1.125	-0.1273±1.12
P₁	6.2e-5±9.9e-6	-1.8e-6±1.2e-5
P₂	-0.0008±1.5e-5	-9.7e-5±1.8e-5
s**	-0.00027±3.0e-6	-0.00026±3.0e-6

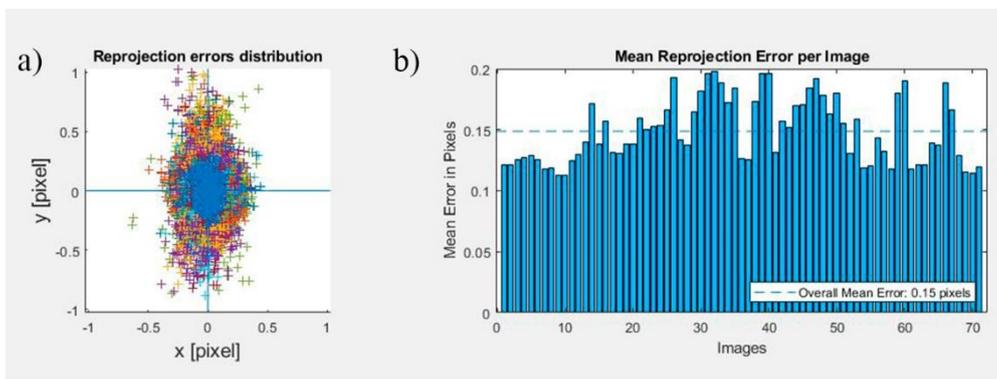


Figura 20: Errores de reproyección calibración interna cámara izquierda para ensayos a 28 días. a) Distribución de los errores de reproyección de los puntos; b) Error de reproyección medio por imagen. Fuente: Elaboración propia.

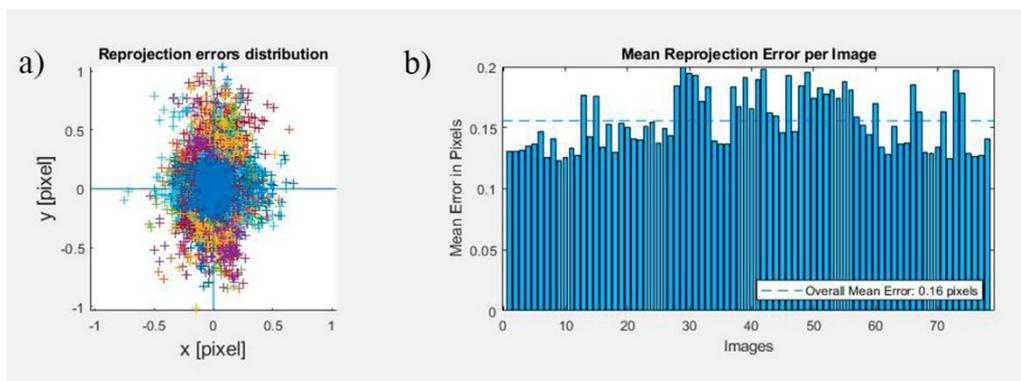


Figura 21: Errores de reproyección calibración interna cámara derecha para ensayos a 28 días. a) Distribución de los errores de reproyección de los puntos; b) Error de reproyección medio por imagen. Fuente: Elaboración propia.

Para llevar a cabo el proceso de orientación externa, se capturó una imagen simultánea desde ambas cámaras del objeto de calibración cilíndrico (Figura 16). Los puntos detectados en la imagen de cada una de las cámaras fueron utilizados para la obtención de los parámetros DLT (Tabla 10) mediante la Ecuación 4, de manera que los pares de imágenes capturados por ambas cámaras pueden ser reconstruidos tridimensionalmente de acuerdo a dichos parámetros. Además, los puntos detectados en las imágenes de calibración fueron reproyectados (Figura 22) con el fin de analizar el error obtenido en la reconstrucción, obteniendo un error medio de 0.0104 mm y un RMSE de 0.155 mm. Tal y como se muestra en la Figura 22c, el mayor error viene dado en el eje y, que se corresponde con el eje perpendicular al plano de la lente.

Tabla 11: Parámetros DLT de las cámaras para ensayos a 28 días.

Parámetro	Cámara Izquierda	Cámara Derecha
L1	-11.6658	-1132816
L2	-1.0719	-3.0578
L3	0.0522	-0.0042
L4	2577.8016	2608.2983
L5	-0.14036	0.1844
L6	-1.3391	-1.4868
L7	-11.5579	-11.5311
L8	3032.1546	3180.9927
L9	-5.51e-5	7.64e-05
L10	-0.00075	-0.00077
L11	9.64e-07	1.00e-05

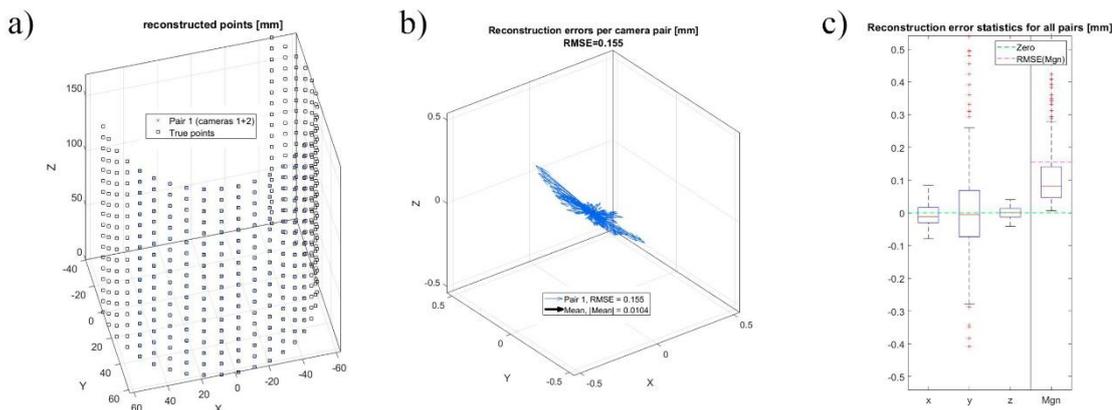


Figura 22: Reconstrucción 3D mediante DLT para ensayos a 28 días. a) Puntos reconstruidos y puntos verdaderos; b) Dirección de errores de reconstrucción; c) Errores de reconstrucción en cada eje. Fuente: Elaboración propia.

6.3. Correlación y reconstrucción 3D

Con el fin de obtener los desplazamientos de la probeta se llevó a cabo el enfoque DIC definido en la Sección 4.2.3 a través del software Ncorr (Blaber et al., 2015), de manera que las imágenes fueron correlacionadas tanto con las de su correspondiente cámara como con sus homólogas en la otra cámara tal y como se mostró en la Figura 9. Respecto a los parámetros propios de la correlación digital de imágenes, se empleó un tamaño de subconjunto de 20 píxeles y una superposición del 35% (step de 7 px) para garantizar una configuración DIC adecuada (Sutton et al., 2009). Teniendo en cuenta la profundidad de campo y el ángulo estéreo, se definió una Región de Interés (ROI) visible en las imágenes de ambas cámaras tal y como se muestra en la Figura 23.

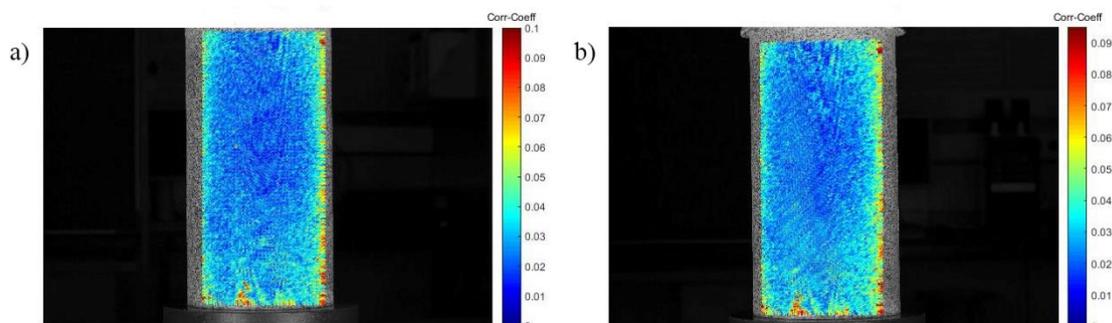


Figura 23: Coeficiente de correlación C_{LS} de las imágenes 2D en la Región de Interés (ROI). a) Imagen de cámara izquierda; b) Imagen de cámara derecha. Fuente: Elaboración propia.

La correlación permitió obtener una matriz de puntos coincidentes en cada par estéreo cuyas coordenadas se corresponden a los centros de los subconjuntos. La calidad de la correlación puede ser evaluada mediante el coeficiente de correlación C_{LS} , que se muestra en la Figura 23 para cada uno de los puntos de las imágenes 2D. Los bajos valores de C_{LS} (donde 0 indica una correlación total) indican la alta precisión obtenida durante la correlación de las imágenes (Blaber et al., 2015), lo que garantiza que los subconjuntos fueron identificados y encontrados en las imágenes homólogas. En general, el coeficiente de correlación es inferior a 0.05, a excepción de los bordes de la ROI, en los que tanto el contorno como la profundidad de campo dificultan sensiblemente el matching de los puntos cercanos a los bordes.

La matriz bidimensional fue transformada en una nube de puntos 3D mediante la Ecuación 6 y los parámetros DLT obtenidos anteriormente, de manera que los puntos asociados a cada imagen del par estéreo fueron convertidos en un único punto común con coordenadas tridimensionales. La Figura 24 muestra la reconstrucción 3D junto con el coeficiente de correlación C_{LS} combinado, pudiendo apreciarse lo comentado anteriormente para el caso de las imágenes 2D, donde los valores más altos se sitúan en el contorno de la ROI.

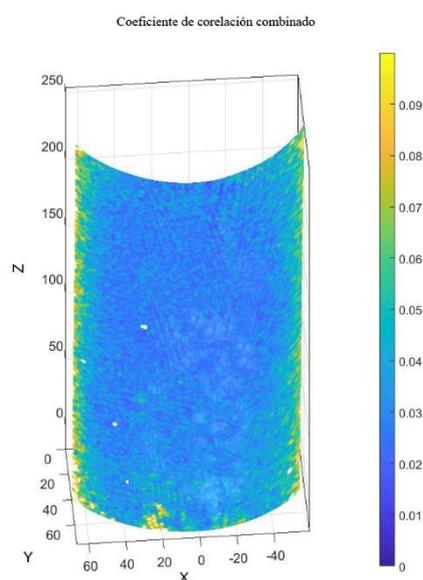


Figura 24: Puntos de imagen correspondientes detectados mediante DIC con su coeficiente de correlación. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de validar la reconstrucción 3D de la parte correspondiente a la ROI de las probetas, se llevó a cabo un análisis de la curvatura de la misma. La superficie fue

seccionada de manera horizontal para cada uno de los puntos verticales obteniendo así para cada una de estas secciones un arco de circunferencia cuyo diámetro fue calculado. Los resultados obtenidos para el diámetro de cada una de las probetas (media \pm STD) son mostrados en la Tabla 11, junto con el diámetro medio obtenido de dos mediciones de la probeta realizadas con pie de rey previamente a los ensayos.

Tabla 12: Diámetros de las probetas (mm).

Probeta	Diámetro real	Diámetro medio reconstrucción	STD reconstrucción
ZH-1	150.1	149.6	0.6
ZH-2	149.9	149.2	0.7
ZH-3	149.3	148.8	0.7
ZH-4	149.4	149.1	0.4
ZC-1	149.8	149.3	0.7
ZC-2	149.7	149.2	0.9
ZC-3	149.8	149.5	0.7
ZC-4	149.6	149.2	0.6

Los valores reales de diámetro medidos se sitúan dentro de los rangos obtenidos de la reconstrucción tridimensional de la probeta. Los resultados pueden considerarse aceptables teniendo en cuenta las variaciones de volumen que pueden experimentar las probetas de hormigón en el proceso de hidratación y curado (Dzaye et al., 2019), las cuales provocan ligeras irregularidades en el diámetro a lo largo de sus secciones. Además, ligeras desviaciones angulares a la hora de establecer los ejes para la reconstrucción tridimensional de las coordenadas, pueden provocar que el eje axial de las probetas no se encuentre completamente alineado con el eje Z. Estas pequeñas desviaciones pueden causar errores submilimétricos a la hora de calcular el diámetro de la circunferencia correspondiente al arco seccionado en la ROI.

6.4. Análisis de desplazamientos y deformaciones

Una vez se llevó a cabo el enfoque 3D-DIC, se obtuvo un campo completo de desplazamientos en toda la ROI (Figura 25) para cada estado de carga de cada una de las probetas. Dado que el eje Z se corresponde con el eje axial en el que se aplica la carga de compresión, los desplazamientos obtenidos en este eje (Figura 25c) serán convertidos en deformaciones longitudinales a través de extensómetros virtuales que simularán los extensómetros empleados de manera convencional como instrumentos de medición de deformaciones. No obstante, los desplazamientos sufridos tanto en el eje X como en el eje Y (Figuras 25a y 25b) permiten comprender el comportamiento de la probeta y detectar posibles irregularidades en la superficie de la misma.

En el caso mostrado en la Figura 25 correspondiente a la probeta ZC1, puede apreciarse una irregularidad en la parte superior izquierda de la ROI para los desplazamientos en los ejes X e Y, que también se manifiesta ligeramente en los desplazamientos en Z. Se trata de un estado de carga previo a la rotura, la cual se manifiesta posteriormente mediante grietas en la misma zona en la que se aprecia dicha irregularidad.

Comportamientos similares se han observado para el resto de probetas, en los que aparecen irregularidades en los estados previos a la rotura que pueden asociarse a “áreas débiles” sobre las que se produce la falla (Abdulqader & Rizos, 2020) y que serían muy complicados de detectar sin el enfoque 3D-DIC. Además, en el caso de los hormigones reciclados este tipo de zonas pueden presentarse con mayor evidencia debido a la variabilidad del comportamiento de los áridos empleados.

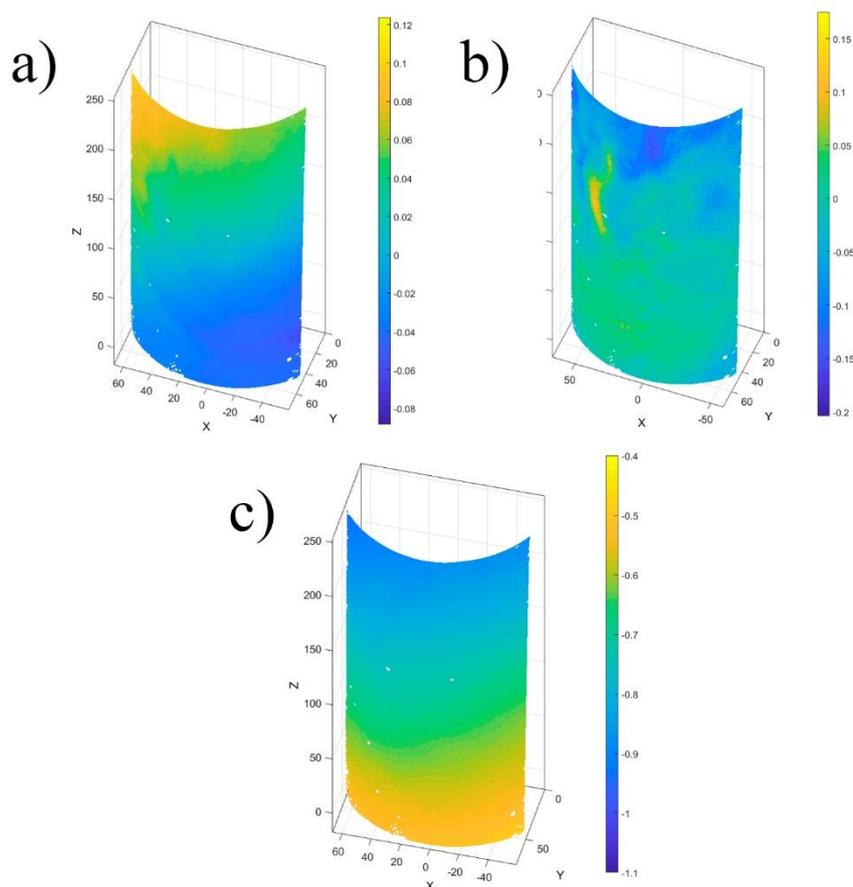


Figura 25: Desplazamientos obtenidos a través del enfoque 3D-DIC en la probeta ZC1. a) Desplazamientos X en mm; b) Desplazamientos Y en mm; c) Desplazamientos Z en mm. Fuente: Elaboración propia.

6.4.1. Extensómetros virtuales

Con el fin de analizar las deformaciones del material y considerar su comportamiento heterogéneo, se dispusieron extensómetros virtuales verticales a lo largo de toda la ROI (Figura 26) siguiendo el enfoque llevado a cabo por García-Martín et al. (García-Martín et al., 2020).

Los extensómetros se colocaron en la zona central de la probeta con una longitud igual a un tercio de su altura (100mm) y con una separación entre cada uno de ellos de 5mm. Los desplazamientos de los puntos superiores e inferiores permiten calcular la deformación unitaria en el segmento correspondiente a cada extensómetro.

De esta forma, para cada una de las probetas se obtuvieron un total de 22 extensómetros, de los que se puede extraer el valor de deformación longitudinal para cada uno de los pares estereoscópicos, asociados a su correspondiente valor de carga.

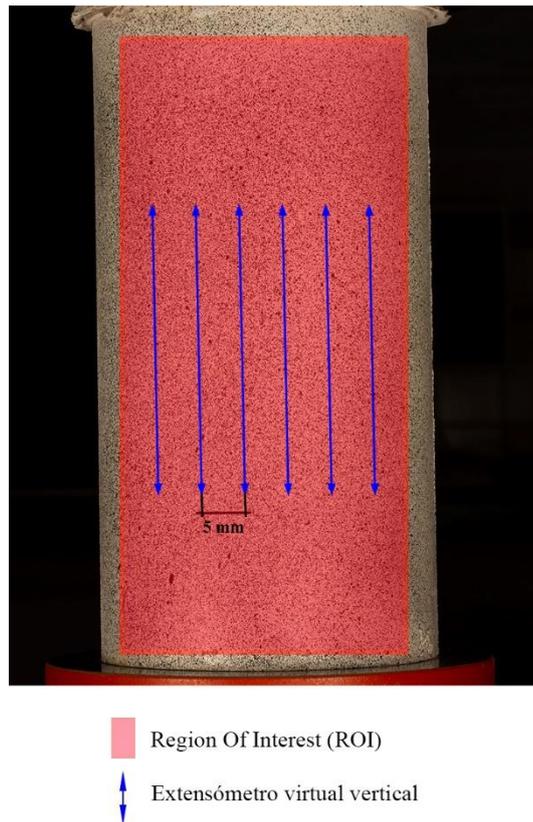


Figura 26: Evaluación de la deformación longitudinal mediante extensómetros virtuales. Fuente: Elaboración propia.

6.4.2. Curvas Tensión-Deformación

Los extensómetros virtuales permiten extraer las deformaciones unitarias comprendidas entre los puntos superior e inferior, de manera que estas deformaciones pueden ser asociadas con los valores de carga correspondientes para obtener las curvas de tensión-deformación asociado a cada una de ellas. En las figuras 27-28 y 30-31 se muestran las curvas correspondientes a los ensayos a 7 días mientras que en las figuras 28-29 y 32-33 se muestran las curvas correspondientes a los ensayos a 28 días.

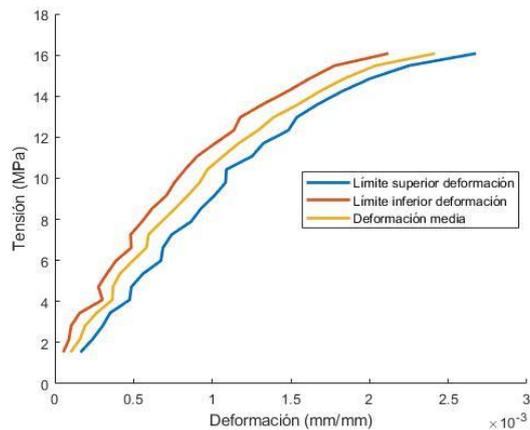


Figura 27: Curva tensión/deformación de la probeta ZH1 a 7 días. Fuente: Elaboración propia.

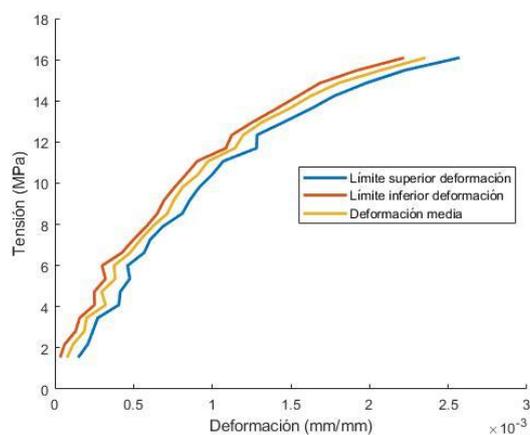


Figura 28: Curva tensión/deformación de la probeta ZH2 a 7 días. Fuente: Elaboración propia.

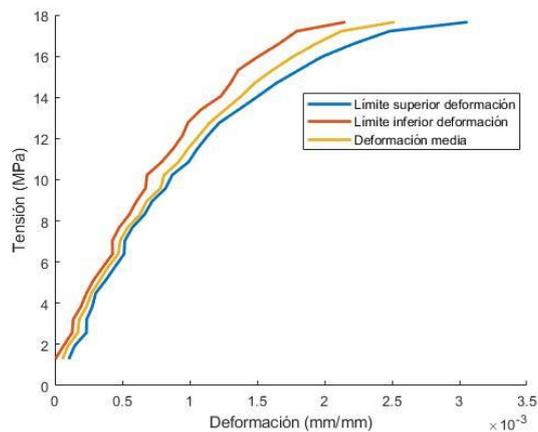


Figura 29: Curva tensión/deformación de la probeta ZH3 a 28 días. Fuente: Elaboración propia.

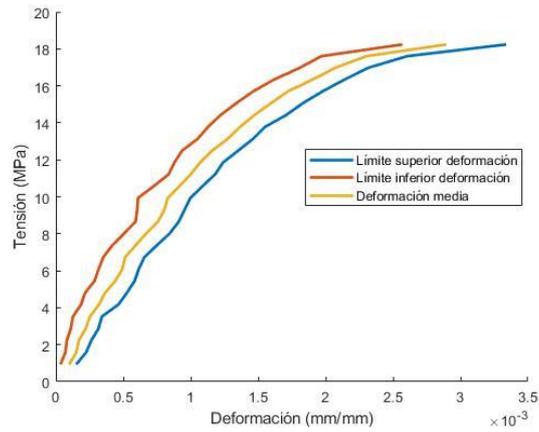


Figura 30: Curva tensión/deformación de la probeta ZH4 a 28 días. Fuente: Elaboración propia.

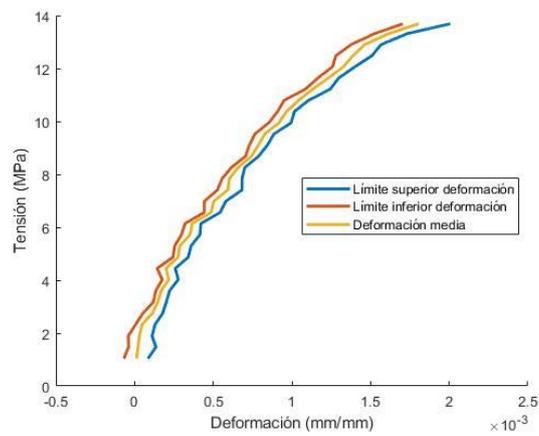


Figura 31: Curva tensión/deformación de la probeta ZC1 a 7 días. Fuente: Elaboración propia.

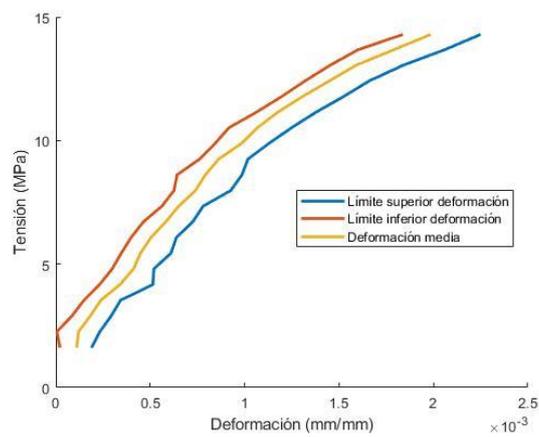


Figura 32: Curva tensión/deformación de la probeta ZC2 a 7 días. Fuente: Elaboración propia.

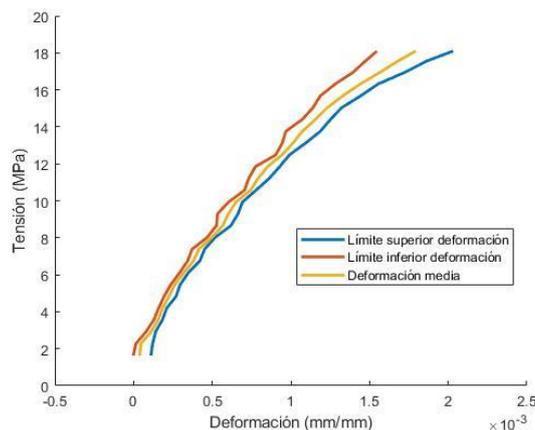


Figura 33: Curva tensión/deformación de la probeta ZC3 a 28 días. Fuente: Elaboración propia.

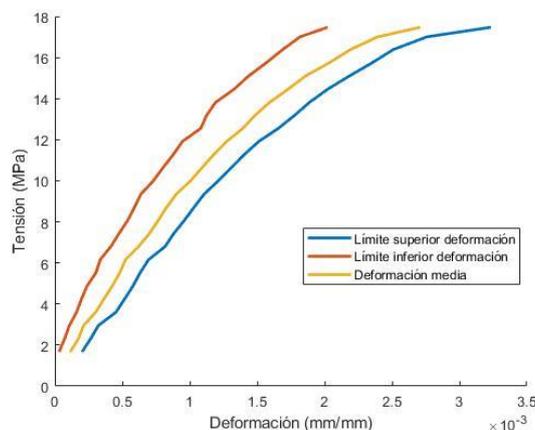


Figura 34: Curva tensión/deformación de la probeta ZC4 a 28 días. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que el diámetro de las probetas cilíndricas es constante, el estado de tensiones podría considerarse también constante en toda la probeta. Consecuentemente, las deformaciones producidas deberían ser similares en toda la ROI y para cada uno de los extensómetros virtuales.

Sin embargo, los resultados obtenidos del enfoque 3D-DIC revelaron una distribución heterogénea de las deformaciones correspondientes a los extensómetros virtuales. Estas variaciones en las deformaciones indican la presencia de diferentes propiedades mecánicas en la ROI causadas por la heterogeneidad del material y manifestadas en mayor medida en la interfaz entre el cemento y las partículas de áridos gruesos (Okeil, Matsumoto, & Nagai, 2020).

6.5. Discusión de resultados

6.5.1. Resistencia a compresión y deformación máxima

Con el fin de evaluar las capacidades mecánicas de los materiales y comparar el comportamiento de ambos hormigones, se extrajeron las deformaciones máximas correspondientes a las tensiones máximas previas a la rotura para cada una de las probetas (Tabla 12 y 13). Dado que las imágenes son capturadas cada 0.6 MPa, el valor f_c se corresponde con la tensión máxima asociada a la imagen capturada inmediatamente anterior a la rotura. No obstante, se proporcionan también los valores exactos de resistencia a compresión (f_{c7}).

Tabla 13: Resultados obtenidos de la caracterización mecánica empleando el enfoque 3D-DIC para la Resistencia a compresión a 7 días en MPa (f_{c7}), la Tensión máxima previa a la rotura en MPa (f_c) y la Deformación para la tensión máxima en mm/mm (ϵ_{max}). Coeficiente de Variación (CoV) en %.

Probeta	f_{c7}	f_c	ϵ_{max} Media	ϵ_{max} Límite superior	ϵ_{max} Límite inferior	CoV ϵ_{max}
ZH-1	16.15	16.07	0.00242	0.00268	0.00212	4.51
ZH-2	16.36	16.14	0.00236	0.00257	0.00222	3.74
ZC-1	13.77	13.74	0.00181	0.00201	0.00171	3.79
ZC-2	14.72	14.37	0.00199	0.00225	0.00184	6.82

Tabla 14: Resultados obtenidos de la caracterización mecánica empleando el enfoque 3D-DIC para la Resistencia a compresión a 28 días en MPa (f_{c28}), la Tensión máxima previa a la rotura en MPa (f_c) y la Deformación para la tensión máxima en mm/mm (ϵ_{max}). Coeficiente de Variación (CoV) en %.

Probeta	f_{c28}	f_c	ϵ_{max} Media	ϵ_{max} Límite superior	ϵ_{max} Límite inferior	CoV ϵ_{max}
ZH-3	17.82	17.77	0.00252	0.00306	0.00215	9.66
ZH-4	18.56	18.24	0.00289	0.00333	0.00257	7.19
ZC-3	18.10	18.10	0.00180	0.00203	0.00155	8.47
ZC-4	17.50	17.47	0.00271	0.00323	0.00202	12.98

Los resultados obtenidos para la resistencia a compresión con un tiempo de curado de 7 días manifiestan una diferencia entre las probetas fabricadas con residuos de hormigón y las fabricadas con residuos cerámicos. De igual forma, la deformación asociada a la tensión máxima para las probetas fabricadas con residuos de hormigón fue mayor. Considerando los valores a 28 días respecto a los de 7 días, puede observarse como la resistencia aumenta ligeramente en ambos tipos de hormigón. Sin embargo, la diferencia existente entre ambos se ve reducida, igualándose así las propiedades de uno y otro.

Respecto a cada uno de los tipos de hormigón, los fabricados con residuos de hormigón presentaron un comportamiento muy similar tanto en resistencia a compresión como en deformación máxima (valor promedio), con una variación del 1.3 % y del 2.5 % respectivamente para los valores a 7 días y una variación del 3.99 % y 12.80 % respectivamente para los valores a 28 días.

Por su parte, los fabricados con residuos cerámicos presentaron una variación del 6.5 % respecto a su resistencia a compresión a 7 días y del 3.31 % a 28 días, y una variación del 9.0 % para la deformación máxima (valor promedio) a 7 días y del 33.58 % a 28 días. En este sentido, cabe destacar una anomalía en la probeta ZC-4 ensayada a 28 días, presentando una resistencia menor que su homóloga ZC-3 pero una deformación mayor.

A pesar de que los ensayos presentados únicamente incorporan dos probetas para cada uno de los tipos de hormigón y tiempo de curado, puede apreciarse que existe una diferencia notable tanto para la resistencia a compresión como para la deformación máxima entre las probetas ZH y ZC para un tiempo de curado de 7 días, que se ve reducida para una curación de 28 días como ya se había comentado anteriormente.

Además, los extensómetros virtuales colocados en cada probeta manifiestan la heterogeneidad del material, permitiendo obtener diferentes valores de las propiedades mecánicas para una misma probeta. De esta forma, los resultados no se limitan a mediciones puntuales, sino que es posible establecer una distribución de dichas propiedades. En este sentido, los resultados obtenidos muestran cómo para un tiempo de curado mayor (28 días), la heterogeneidad es mayor, obteniendo unos coeficientes de variación más elevados que los correspondientes a 7 días.

6.5.2. Aproximación del módulo secante de elasticidad

Con el fin de mostrar el valor añadido de los datos obtenidos del enfoque 3D-DIC, se realizó un cálculo aproximado del módulo secante de elasticidad para cada una de las probetas ensayadas considerando también la heterogeneidad de los valores de estas propiedades mecánicas.

En este sentido, cabe destacar que el ensayo para la obtención del módulo de elasticidad en hormigones (AENOR, 2014b) difiere del ensayo de rotura. Si bien los ensayos llevados a cabo en el presente estudio presentan una aplicación de la carga de manera lineal, el ensayo requerido para el módulo elástico sugiere una aplicación de la carga por ciclos, considerando tres estados de carga: (i) tensión de precarga; (ii) tensión inferior; y (iii) tensión superior. Así, la diferencia entre estas tensiones será empleada junto con sus deformaciones asociadas para la obtención del módulo secante de elasticidad.

Para llevar a cabo la aproximación del módulo secante de elasticidad a partir de los ensayos de rotura, se ha tomado el valor de tensión superior, correspondiente a un tercio del valor de la resistencia a compresión ($f_c/3$), estableciendo su relación con la deformación asociada. Los cálculos de esta relación se llevaron a cabo para cada uno de los extensómetros virtuales de las probetas, mostrándose en las Tablas 14 y 15 el valor medio para cada probeta y sus variaciones para 7 y 28 días respectivamente.

Tabla 15: Resultados obtenidos de la caracterización mecánica empleando el enfoque 3D-DIC para la aproximación del módulo secante de elasticidad a 7 días en MPa ($f_c/3/\epsilon_{max}$). Coeficiente de variación (CoV) en %.

Probeta	$E_{aproximado}$ Media	$E_{aproximado}$ Límite superior	$E_{aproximado}$ Límite inferior	CoV $E_{aproximado}$
ZH-1	13229.21	16207.30	9553.52	14.56
ZH-2	14070.66	16626.08	11244.97	9.32
ZC-1	17743.40	19939.32	14248.17	8.99
ZC-2	11989.02	16109.60	9254.56	16.84

Tabla 16: Resultados obtenidos de la caracterización mecánica empleando el enfoque 3D-DIC para la aproximación del módulo secante de elasticidad a 28 días en MPa ($f_c/3/\epsilon_{max}$). Coeficiente de variación (CoV) en %.

Probeta	$E_{aproximado}$ Media	$E_{aproximado}$ Límite superior	$E_{aproximado}$ Límite inferior	CoV $E_{aproximado}$
ZH-3	14664.02	16131.03	12935.94	6.59
ZH-4	12824.50	19172.84	9904.01	20.75
ZC-3	19211.61	20869.54	17565.46	4.68
ZC-4	11978.70	18147.55	8729.23	22.56

Los resultados obtenidos para el módulo secante de elasticidad medio para cada probeta muestran una mayor similitud entre las dos probetas fabricadas con residuos de hormigón tanto para 7 como para 28 días de curación. Sin embargo, los resultados de las probetas fabricadas con residuos cerámicos sugieren una mayor diferencia entre ellas, tal y como ocurría con los valores de resistencia a compresión y deformación máxima.

Respecto a los resultados para los diferentes tiempos de curado, puede observarse como los valores medios del módulo de elasticidad son similares tanto para 7 como para 28 días en cada uno de los tipos de hormigón.

Los coeficientes de variación en este caso son superiores a los obtenidos para los valores de resistencia a compresión y deformación máxima, lo que muestra la heterogeneidad del comportamiento del material también en los estados de carga intermedios. En este sentido, los valores absolutos más bajos para la deformación correspondiente a este estado de carga propician la aparición de elevados valores del CoV.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso una nueva metodología, configuración y protocolo 3D-DIC que permitió llevar a cabo el análisis de las propiedades mecánicas de hormigones reciclados. A continuación, se exponen las principales conclusiones obtenidas de la realización del estudio.

La Correlación Digital de Imágenes 3D se presenta como una técnica idónea en el estudio y caracterización de materiales cuya superficie no es plana, ya que permite realizar su reconstrucción tridimensional con precisión y obtener los desplazamientos y deformaciones de campo completo. Además, se trata de una técnica de carácter no invasivo y no destructivo, que constituye una alternativa de muy bajo coste en comparación a otras técnicas convencionales invasivas y destructivas como las galgas extensiométricas.

En este sentido, cabe destacar que el prototipo empleado junto con el software libre permitió llevar a cabo el estudio alcanzando unos resultados exitosos con un coste inferior a 2.000€, frente a otros sistemas comerciales DIC cuyo coste puede alcanzar los 50.000€. Además, el prototipo puede ser empleado para múltiples ensayos sin coste adicional, a diferencia de los costes que suponen otros métodos convencionales como las galgas extensiométricas de un único uso.

Con el fin de evaluar la precisión de la configuración 3D-DIC, se llevó a cabo un análisis de la reconstrucción tridimensional de la ROI, obteniendo unos diámetros virtuales para las probetas similares a los medidos físicamente. Los valores medidos se sitúan dentro del rango obtenido para la reconstrucción, pudiendo asociar los errores a las variaciones de volumen de la probeta y a pequeñas desviaciones angulares en los ejes de reconstrucción que pueden afectar a las coordenadas absolutas de los puntos empleados para el cálculo de las circunferencias.

Los desplazamientos de campo completo obtenidos del enfoque 3D-DIC fueron convertidos en deformaciones longitudinales asociados al eje axial Z a través de extensómetros virtuales, obteniendo así un total de 22 medidas de deformación para cada una de las probetas. Los resultados obtenidos de los extensómetros revelaron un

comportamiento heterogéneo de las propiedades mecánicas en la ROI, característico de este tipo de hormigones debido a la variabilidad de los áridos reciclados.

La comparativa de las propiedades obtenidas de las probetas del tipo ZH con respecto a las probetas ZC demuestran que los hormigones fabricados con áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón obtienen una resistencia a compresión y una deformación máxima mayor que los fabricados con áridos procedentes de residuos cerámicos. No obstante, la comparativa entre los ensayos a 7 y 28 días demostró que esta diferencia de propiedades se reduce a medida que aumenta el tiempo de curado. Además, los datos obtenidos de los diferentes extensómetros virtuales sugirieron una mayor incertidumbre y heterogeneidad en los hormigones fabricados con residuos cerámicos.

Por último, se llevó a cabo una aproximación del módulo secante de elasticidad, en la que se puso de manifiesto nuevamente la diferencia entre las propiedades ambos tipos de hormigón y la mayor variabilidad para los hormigones cerámicos.

Los trabajos futuros se centrarán en el uso de los datos de campo completo proporcionados por el enfoque 3D-DIC para la obtención de las distribuciones espaciales de las propiedades mecánicas y la posterior evaluación de modelos numéricos con enfoques probabilísticos. Además, la metodología propuesta se utilizará para la evaluación de hormigones con diferentes dosificaciones y edades de curado, lo que permitirá llevar a cabo análisis similares para estudiar su comportamiento y optimizar sus propiedades mecánicas.

REFERENCIAS

- Abbel-Aziz, Y. I. (1971). *Direct linear transformation from comparator coordinates in close-range photogrammetry*.
- Abdulqader, A., & Rizos, D. C. (2020). Advantages of Using Digital Image Correlation Techniques in Uniaxial Compression Tests. *Results in Engineering*, 100109-102590-101230.
- AENOR. (2009). UNE-EN 12390-2 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia". In.
- AENOR. (2014a). UNE-EN 12390-1 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de probetas y moldes" In.
- AENOR. (2014b). UNE-EN 12390-13 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión". In.
- AENOR. (2020). UNE-EN 12390-3 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas" In.
- Alaejos, M. P., Sánchez, M., Sinis, F., & Cano, H. (2008). Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción. *CEDEX para el Ministerio de Medio Ambiente*.
- Alaejos, P., Domingo, A., & Monleón, S. (2005). *Puente reciclado sobre el río Turia en Manises (Valencia)*.
- Asociación Española de Gestores de Rcd, G. (2012). Guía española de áridos Reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). *Madrid, España*.
- Bai, G., Zhu, C., Liu, C., & Liu, B. (2020). An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and building materials*, 240, 117978-110950-110618.
- Berfield, T. A., Patel, J. K., Shimmin, R. G., Braun, P. V., Lambros, J., & Sottos, N. R. (2007). Micro-and nanoscale deformation measurement of surface and internal planes via digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 47(1), 51-62 0014-4851.
- Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. (2015). Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software. *Experimental Mechanics*, 55(6), 1105-1122 0014-4851.
- Bustillo, M. (2010). Manual de RCD y áridos reciclados. *Fueyo Editores, SL Madrid*.

- Byrne, E., Simonsen, M. . (2016). Lens Selection and Stereo Angle. Retrieved from <http://www.correlatedsolutions.com/support/index.php?Knowledgebase/Article/View/50/1/lens-selection-and-stereo-angle>
- Cardoso, R., Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. (2016). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste management*, *49*, 131-145 0956-0053X.
- Chen, Y., Wei, J., Huang, H., Jin, W., & Yu, Q. (2018). Application of 3D-DIC to characterize the effect of aggregate size and volume on non-uniform shrinkage strain distribution in concrete. *Cement and Concrete Composites*, *86*, 178-189 0958-9465.
- Concrete Permanent, C. (2008). Instrucción Del Hormigón Estructural EHE-08 (Spanish Structural Concrete Code). *Spanish Minister of Public Works: Madrid, Spain*.
- Corinaldesi, V. (2012). Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings. *Construction and building materials*, *35*, 778-784 0950-0618.
- De Brito, J., Ferreira, J., Pacheco, J., Soares, D., & Guerreiro, M. (2016). Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. *Journal of Building Engineering*, *6*, 1-16 2352-7102.
- de Oliveira Andrade, J. J., Possan, E., Squiavon, J. Z., & Ortolan, T. L. P. (2018). Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. *Construction and building materials*, *161*, 70-83 0950-0618.
- Dong, Y. L., & Pan, B. (2017). A review of speckle pattern fabrication and assessment for digital image correlation. *Experimental Mechanics*, *57*(8), 1161-1181 0014-4851.
- Duan, Z. H., & Poon, C. S. (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials & Design*, *58*, 19-29 0261-3069.
- Dzaye, E. D., Tsangouri, E., Spiessens, K., De Schutter, G., & Aggelis, D. G. (2019). Digital image correlation (DIC) on fresh cement mortar to quantify settlement and shrinkage. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *19*(1), 205-214 1644-9665.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*, *37*(5), 735-742 0008-8846.

- Eurostat. (2018). Waste Statistics, gestión de residuos (env_wasgen). In.
- Fernández-Canovas, M. (2013). *Hormigón*. Madrid, España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- García-Martin, R., López-Rebollo, J., Sánchez-Aparicio, L. J., Fueyo, J. G., Pisonero, J., & González-Aguilera, D. (2020). Digital image correlation and reliability-based methods for the design and repair of pressure pipes through composite solutions. *Construction and building materials*, 248, 118625-118638.
- González-Fonteboa, B., Seara-Paz, S., De Brito, J., González-Taboada, I., Martínez-Abella, F., & Vasco-Silva, R. (2018). Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis. *Materiales de construcción*, 68(330), 151-158.
- Guo, Z., Tu, A., Chen, C., & Lehman, D. E. (2018). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 199, 136-149.
- Hoy. (2020). Carretera de Zarza de Granadilla, remozada con áridos reciclados. Hoy. Retrieved from <https://www.hoy.es/caceres/seguiremos-fomentando-aridos-20200517123205-nt.html?ref=https://www.google.com/>
- Ieca, X. (2013). Carriles bici con pavimento de hormigón. In: Recuperado el.
- Juan-Valdés, A., Rodríguez-Robles, D., García-González, J., Guerra-Romero, M. I., & Morán-del Pozo, J. M. (2018). Mechanical and microstructural characterization of non-structural precast concrete made with recycled mixed ceramic aggregates from construction and demolition wastes. *Journal of Cleaner Production*, 180, 482-493.
- Kang, J., Ososkov, Y., Embury, J. D., & Wilkinson, D. S. (2007). Digital image correlation studies for microscopic strain distribution and damage in dual phase steels. *Scripta Materialia*, 56(11), 999-1002.
- Ke, X. D., Schreier, H. W., Sutton, M. A., & Wang, Y. Q. (2011). Error assessment in stereo-based deformation measurements. *Experimental Mechanics*, 51(4), 423-441.
- Kozicki, J., & Tejchman, J. (2013). Application of DIC technique to concrete—study on objectivity of measured surface displacements. *Experimental Mechanics*, 53(9), 1545-1559.

- Le, D. B., Tran, S. D., Torero, J. L., & Dao, V. T. N. (2019). Application of digital image correlation system for reliable deformation measurement of concrete structures at high temperatures. *Engineering Structures*, 192, 181-189 0141-0296.
- Lecompte, D., Sol, H., Vantomme, J., & Habraken, A. (2006). *Analysis of speckle patterns for deformation measurements by digital image correlation*.
- Liu, B., Guo, J., Wen, X., Zhou, J., & Deng, Z. (2020). Study on flexural behavior of carbon fibers reinforced coral concrete using digital image correlation. *Construction and building materials*, 242, 117968 110950-110618.
- López-Uceda, A., Ayuso, J., Jiménez, J. R., Agrela, F., Barbudo, A., & De Brito, J. (2016). Upscaling the use of mixed recycled aggregates in non-structural low cement concrete. *Materials*, 9(2), 91.
- Luu, L., Wang, Z., Vo, M., Hoang, T., & Ma, J. (2011). Accuracy enhancement of digital image correlation with B-spline interpolation. *Optics letters*, 36(16), 3070-3072 1539-4794.
- Mansur, M. A., Wee, T. H., & Lee, S. C. (1999). Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. *Materials Journal*, 96(4), 478-484 0889-0325X.
- Martín-Morales, M., Cuenca-Moyano, G. M., Valverde-Espinosa, I., & Valverde-Palacios, I. (2017). Effect of recycled aggregate on physical-mechanical properties and durability of vibro-compacted dry-mixed concrete hollow blocks. *Construction and building materials*, 145, 303-310 0950-0618.
- Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., & Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and building materials*, 25(2), 742-748 0950-0618.
- Martinho, F. C. G., Picado-Santos, L. G., & Captao, S. D. (2018). Influence of recycled concrete and steel slag aggregates on warm-mix asphalt properties. *Construction and building materials*, 185, 684-696 0950-0618.
- MásQueIngeniería. (2018). Hormigones Especiales (VI): Uso no estructural. Retrieved from <https://masqueingenieria.com/blog/hormigones-especiales-uso-no-estructural/>
- McNeil, K., & Kang, T. H. K. (2013). Recycled concrete aggregates: A review. *International journal of concrete structures and materials*, 7(1), 61-69 1976-0485.

-
- Medina, C., De Rojas, M. I. S., & Frías, M. (2012). Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 48-54 0958-9465.
- Medina, C., Zhu, W., Howind, T., Frías, M., & de Rojas, M. I. S. (2015). Effect of the constituents (asphalt, clay materials, floating particles and fines) of construction and demolition waste on the properties of recycled concretes. *Construction and building materials*, 79, 22-33 0950-0618.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & McGlone, J. C. (2001). Introduction to modern photogrammetry. *New York*, 19.
- Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., & Hisada, M. (2004). Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and concrete research*, 34(6), 965-971 0008-8846.
- Nepomuceno, M. C. S., Isidoro, R. A. S., & Catarino, J. P. G. (2018). Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. *Construction and building materials*, 165, 284-294 0950-0618.
- Okeil, A., Matsumoto, K., & Nagai, K. (2020). Local Bond Behavior in Concrete and Cement Paste around a Deformed Bar by Using DIC Technique. *Cement and Concrete Composites*, 103540 100958-109465.
- Pan, B. (2009). Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement. *Applied optics*, 48(8), 1535-1542 % @ 2155-3165.
- Pan, B. (2018). Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. *Measurement science and technology*, 29(8), 082001 080957-080233.
- Pan, B., Li, K., & Tong, W. (2013). Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations. *Experimental Mechanics*, 53(7), 1277-1289 0014-4851.
- Pan, B., Lu, Z., & Xie, H. (2010). Mean intensity gradient: an effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(4), 469-477 0143-8166.
- Pan, B., Qian, K., Xie, H., & Asundi, A. (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement science and technology*, 20(6), 062001 060957-060233.

- Peters, W. H., & Ranson, W. F. (1982). Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical engineering*, 21(3), 213427-213286.
- Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and environment*, 42(1), 407-415 0360-1323.
- Reu, P. (2013). A study of the influence of calibration uncertainty on the global uncertainty for digital image correlation using a Monte Carlo approach. *Experimental Mechanics*, 53(9), 1661-1680 0014-4851.
- Reu, P. (2014a). All about speckles: aliasing. *Experimental Techniques*, 38(5), 1-3 0732-8818.
- Reu, P. (2014b). All about speckles: speckle size measurement. *Experimental Techniques*, 38(6), 1-2 0732-8818.
- Reu, P. (2015a). All about speckles: contrast. *Experimental Techniques*, 39(1), 1-2 0732-8818.
- Reu, P. (2015b). All about speckles: edge sharpness. *Experimental Techniques*, 39(2), 1-2 0732-8818.
- Reu, P. (2015c). All about speckles: speckle density. *Experimental Techniques*, 39, 1-2.
- Rodríguez, C., Parra, C., Casado, G., Miñano, I., Albaladejo, F., Benito, F., & Sánchez, I. (2016). The incorporation of construction and demolition wastes as recycled mixed aggregates in non-structural concrete precast pieces. *Journal of Cleaner Production*, 127, 152-161 0959-6526.
- Sánchez Roldán, Z. (2019). Utilización de árido reciclado para la fabricación de piezas de hormigón prefabricado de mobiliario urbano.
- Simulink, M. (2018). Camera Calibration and 3-D Vision. Retrieved from https://es.mathworks.com/help/vision/camera-calibration-and-3-d-vision.html?s_tid=CRUX_lftnav
- Solav, D., Moerman, K. M., Jaeger, A. M., Genovese, K., & Herr, H. M. (2018). MultiDIC: An open-source toolbox for multi-view 3D digital image correlation. *IEEE Access*, 6, 30520-30535 32169-33536.
- Sutton, M. A., Orteu, J. J., & Schreier, H. X. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*: Springer Science & Business Media.
- Tian, L., & Pan, B. (2016). Remote bridge deflection measurement using an advanced video deflectometer and actively illuminated LED targets. *Sensors*, 16(9), 1344.

- Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., & Fitzgibbon, A. W. (1999). *Bundle adjustment—a modern synthesis*.
- UNEP. (2014). Sand, rarer than one thinks. *UNEP Global Environment Alert Service*.
- Zink, A. G., Davidson, R. W., & Hanna, R. B. (2007). Strain measurement in wood using a digital image correlation technique. *Wood and fiber science*, 27(4), 346-359 0735-6161.