



**Universidad de Jaén**

Escuela de Doctorado

**UNIVERSIDAD DE**  
**JAÉN**

**Escuela Politécnica  
Superior de Jaén  
Departamento de Ingeniería  
Gráfica, Diseño y Proyectos**

**Tesis Doctoral**



**Aplicación de nuevas metodologías  
BIM a la tecnología de fabricación  
aditiva y moldeo por inyección de  
plástico**

**Presentada por:**

**Daniel Díaz Perete**

**Dirigida por:**

**Dra. D<sup>a</sup>. Cristina Martín Doñate**

**Dr. D. Julio Terrados Cepeda**

**Jaén, octubre 2023**



UNIVERSIDAD DE JAÉN



TESIS DOCTORAL

Aplicación de nuevas metodologías BIM a la  
tecnología de fabricación aditiva y moldeo por  
inyección de plástico

AUTOR

**Daniel Díaz Perete**

DIRECTORA

**Dra. D<sup>a</sup>. Cristina Martín Doñate**

CO-DIRECTOR

**Dr. D. Julio Terrados Cepeda**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GRÁFICA, DISEÑO Y  
PROYECTOS

JAÉN, OCTUBRE 2023



# UNIVERSIDAD DE JAÉN



## TESIS DOCTORAL

Aplicación de nuevas metodologías BIM a la tecnología de fabricación aditiva y moldeo por inyección de plástico

### Tribunal Evaluador

Presidente:	
Secretaria:	
Vocal:	
Suplente:	
Suplente:	





DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GRÁFICA,  
DISEÑO Y PROYECTOS



INSTITUTO POLITÉCNICO DE PORTALEGRE



TESIS DOCTORAL

La memoria titulada: “ **Aplicación de nuevas metodologías BIM a la tecnología de fabricación aditiva y moldeo por inyección de plástico**”, ha sido presentada por el aspirante a doctor por la universidad de Jaén D. Daniel Díaz Perete, bajo la dirección de la Dra. D<sup>a</sup>. Cristina Martín Doñate y el Dr. D. Julio Terrados Cepeda y desarrollada dentro del Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos de la Universidad de Jaén”. La estancia predoctoral de investigación se desarrolló en la escuela politécnica de Portalegre, IPP Portalegre, (Portugal) bajo la supervisión del Dr. D. Paulo Sérgio Duque de Brito.



<p>El doctorando</p> <p>Fdo. Daniel Díaz Perete</p>	
<p>Directora de Tesis</p> <p>Fdo. Dra. D<sup>a</sup>. Cristina Martín Doñate</p>	<p>Co-Director de Tesis</p> <p>Fdo. Dr. D. Julio Terrados Cepeda</p>
<p>Coordinador de estancia de investigación</p> <p>Fdo. Dr. D. Paulo Sérgio Duque de Brito</p>	



# AGRADECIMIENTOS

A mis Padres por su paciencia, apoyo y cariño durante estos años.

Quiero agradecer a mi directora Cristina Martín la confianza depositada en mí desde el ingreso en la Universidad de Jaén, su inestimable ayuda, dedicación y su paciencia a lo largo de la realización de esta tesis. También a mi director Julio Terrados por su apoyo, su guía y sus palabras de ánimo en los momentos más complicados.

A todos los compañeros y amigos del departamento Miguel Ángel Rubio, José Valderrama, Juan Montalvo, Diego García, Antonio Sierra Emilio Muñoz, María Jesús Ortega, Javier Gallego y José Ignacio Rojas por alegrar mi día a día y hacer de la Universidad de Jaén un segundo hogar en este tiempo. A Manuel Hermoso, por tu gran ayuda, por tu amistad y por apostar por mí sin pedir nada a cambio, te lo agradezco.

A Jorge Mercado, compañero, amigo y la piedra angular de mi estancia en esta institución. Gracias por estar, por tu ayuda, por tus consejos y por todo lo demás, tanto en lo laboral como lo personal me has hecho crecer como individuo, sin ti esta tesis no hubiese sido posible.

Hago extensibles mis agradecimientos al resto de personal con el que he tenido el placer de trabajar y compartir momentos y experiencias en el ámbito académico y laboral, Miguel Ángel Gómez, Laura Partal, Juan Manuel Castillo, Jorge Pincay, Isabel María Fernández, Elena Mata, Moisés Rodríguez, Antonio Moreno, Antonio Ortiz y Lucía Galán.

A mis compañeros de Portugal, Paulo Brito por brindarme la oportunidad de trabajar con su equipo, Pedro Romano por su ayuda y consejos académicos, Roberta Panizio y resto de compañeros del IPP de Portalegre.

A Luis Calado por acogerme en Portugal como un hermano incluso en las épocas más difíciles del COVID 19 gran compañero, mejor amigo.

A mis amigos Francisco José Casado, Arturo Moreno, Manuel Javier Fernández, Javier Casuso, Fernando Alcántara, Pablo Bellido, Juan Antonio Romero, Eduardo Duro, Rubén Sánchez, Miguel Díaz, Ángel Luis Mínguez y Rubén Iranzo.

A mi hermano José.



# RESUMEN

La irrupción de la tecnología de BIM (Modelado de Información para la Construcción) marca un avance significativo en la industria de la construcción. Esta transición de la representación bidimensional a la tridimensional, combinada con la digitalización de procesos, la gestión de flujos de trabajo, la optimización de recursos y la reducción de residuos, promete mejoras sustanciales en productividad y rentabilidad en el campo de la ingeniería civil. Tradicionalmente demorada en términos de digitalización y modernización en comparación con otras disciplinas de ingeniería, la ingeniería civil se encuentra ahora en un proceso de transición y evaluación hacia el uso y aplicación de nuevas tecnologías. La incorporación de software paramétrico BIM brinda un control preciso sobre las actividades proyectadas para su ejecución en el lugar de trabajo. Esencialmente, estas herramientas software relacionan la ingeniería civil y otros sectores, especialmente con la ingeniería industrial, que las ha utilizado durante mucho tiempo para diseñar una amplia variedad de productos.

El salto digital en el diseño de construcción facilitado por la tecnología BIM abre caminos para la colaboración interdisciplinaria entre la ingeniería civil y la ingeniería industrial. Una consecuencia de esta interconexión es la posible integración de métodos de fabricación ampliamente utilizados, como la inyección de plástico, y tecnologías emergentes como la fabricación aditiva, en el sector de la construcción. Esta integración anuncia un futuro marcado por la automatización y la robótica, garantizando una reducción de los riesgos laborales comúnmente asociados con la construcción. La gestión efectiva de subproductos, una práctica bien establecida en el sector industrial, alinea los márgenes de beneficio y los estándares de productividad, situando a la industria como paradigma de competitividad en el panorama corporativo y de desarrollo de productos.

Estas nuevas ventajas, alcanzables mediante la adopción de la tecnología BIM y los métodos novedosos de producción, así como la utilización de diversos materiales, incluidos alternativas sostenibles, económicas y basadas en polímeros, auguran un futuro prometedor para el sector de la ingeniería civil. Al mismo tiempo, allana el camino para elevar los estándares de LCA (Life cycle assessment), subrayando el compromiso de la industria con la sostenibilidad, la eficiencia y la gestión ambiental.

Una consecuencia directa de la incorporación de métodos de fabricación industrial es la flexibilidad que ofrecen a los diseñadores para crear geometrías complejas que antes se consideraban inviables utilizando técnicas de construcción tradicionales. Algoritmos para la reducción de peso y el ahorro de material, como los algoritmos de optimización topológica, generan reducciones en el uso de material sin comprometer la integridad estructural requerida, mejorando sustancialmente la eficiencia y la rentabilidad del producto.

Además, los trabajos de investigación desarrollados concluyen en el ámbito de las energías renovables, pues se analiza la recuperación energética y material de los materiales poliméricos propuestos y empleados a lo largo de todo el recorrido de la presente tesis doctoral. La co-gasificación de materiales plásticos, junto con biomasa, ofrece un camino viable y sostenible para gestión de los residuos derivados de las metodologías desarrolladas. Pues el análisis de los mismos muestran niveles prometedores de recuperación de energía alcanzados durante los proceso de co-gasificación.

De esta forma, se completa un ciclo sostenible que comienza con el diseño de elementos civiles mediante herramientas y tecnología de tipo BIM. Continúa con el análisis y viabilidad de fabricación de diseños estructurales y arquitectónicos mediante tecnologías de fabricación industrial innovadoras. Y, finalmente, concluye con la aplicación de un proceso sostenible de recuperación de energía a partir de los residuos generados como es la co-gasificación. Es decir, la presente tesis doctoral incorpora los materiales plásticos utilizados en la construcción en una economía completamente circular. El procedimiento implica valorizar subproductos de la co-gasificación, seguido de un tratamiento adecuado para producir morteros sostenibles con propiedades de resistencia aceptables.

El impacto esperado del trabajo presentado en este compendio tiene como objetivo fomentar la colaboración interdisciplinaria entre la ingeniería civil e industrial. Esto se logra adaptando la tecnología BIM a los nuevos estándares de sostenibilidad y ahorro de material proporcionados por los métodos de fabricación industrial, especialmente la inyección de plástico y la fabricación aditiva. Posteriormente, explora los beneficios ambientales de utilizar materiales poliméricos en proyectos urbanos, en reemplazo de materiales de construcción convencionales. Finalmente, se reutilizan los materiales de desecho de estos proyectos de construcción como morteros, reintegrándolos en el sector de la construcción. Esto representa un paso significativo hacia la industrialización de la ingeniería civil, creando proyectos de construcción más sostenibles, ecológicos y respetuosos con el medio ambiente.

Este compendio también incluye las publicaciones y trabajos de investigación de impacto estrechamente relacionados con el tema central de la presente tesis doctoral.

# ABSTRACT

The emergence of BIM (Building Information Modeling) technology marks a significant advancement in the construction industry. This transition from two-dimensional to three-dimensional representation, coupled with digitalization of processes, workflow management, resource optimization, and waste reduction, promises substantial productivity and profitability enhancements in the realm of civil engineering. Traditionally lagging behind other engineering disciplines in terms of digitization and modernization, civil engineering now stands at the threshold of a transformative era. The incorporation of parametric BIM software empowers precise control over projected activities for on-site execution. Essentially, these software tools bridge the gap between civil engineering and other sectors, particularly industrial engineering, which has long embraced them for designing a wide array of products.

The digital leap in construction design facilitated by BIM technology opens avenues for interdisciplinary collaboration between civil engineering and industrial engineering. One consequence of this interconnection is the potential integration of widely used manufacturing methods, such as plastic injection molding, and emerging technologies like additive manufacturing, into the construction sector. This integration heralds a future marked by automation and robotics, ensuring a reduction in commonly associated labor risks within the construction domain. Effective management of by-products, a well-established practice in the industrial sector, aligns profit margins and productivity standards, positioning the industry as a paragon of competitiveness in the corporate and product development landscape.

These new advantages, attainable through the adoption of BIM technology and novel production methods, as well as the utilization of diverse materials, including sustainable, cost-effective, and polymer-based alternatives, herald a promising future for the civil engineering sector. Simultaneously, it paves the way for elevated LCA (Life Cycle Assessment) standards, underscoring the industry's commitment to sustainability, efficiency, and environmental stewardship.

A direct consequence of incorporating industrial manufacturing methods is the flexibility they afford designers to create complex geometries that were previously deemed unfeasible using traditional construction techniques. Algorithms for weight reduction and material savings, such as topological optimization algorithms, yield reductions in material usage while maintaining the required structural integrity, substantially enhancing product efficiency and profitability.

Furthermore, the research work performed concludes in the field of renewable energies, since the energy and material recovery of the polymeric materials proposed and used throughout the entire course of this doctoral thesis is analyzed. The co-gasification of plastic materials, together with biomass, offers a viable and sustainable path for managing waste derived from the developed methodologies. Well, their

analysis shows promising levels of energy recovery achieved during the co-gasification process.

In this way, a sustainable cycle is completed that begins with the design of civil elements using BIM-type tools and technology. It continues with the analysis and feasibility of manufacturing structural and architectural designs using innovative industrial manufacturing technologies. And, finally, it concludes with the application of a sustainable process of energy recovery from the waste generated such as co-gasification. That is, this doctoral thesis incorporates the plastic materials used in construction in a completely circular economy. The procedure involves valorizing co-gasification by-products, followed by an appropriate treatment to produce sustainable mortars with acceptable resistance properties.

This compendium also includes other impactful publications and research works closely related to the central research theme.

# TABLA DE CONTENIDOS

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>11</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>13</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>15</b>
<b>TABLA DE CONTENIDOS</b> .....	<b>17</b>
<b>ESTRUCTURA DE LA TESIS</b> .....	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 1: MEMORIA</b> .....	<b>21</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	21
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	33
1.3. OBJETIVOS.....	37
1.4. PUBLICACIONES.....	41
1.5. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS .....	45
1.6. CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH LINES.....	49
1.7. REFERENCIAS.....	53
<b>CAPÍTULO 2: COMPENDIO DE TRABAJOS PUBLICADOS</b> .....	<b>59</b>
2.1. ARTÍCULOS PUBLICADOS EN REVISTAS JCR.....	61
2.2. COMUNICACIONES A CONGRESOS INTERNACIONALES Y NACIONALES .....	137



# ESTRUCTURA DE LA TESIS

La memoria de la presente tesis doctoral se estructura en dos partes principales. La primera de ellas, presenta una introducción, descripción de los objetivos de carácter investigador que se proponen para el desarrollo de la tesis, una justificación y alcance de la misma enmarcada en los sectores estratégicos de la construcción y el campo de las energías renovables, una exposición de la generación y publicación del conocimiento vinculado a cada uno de los trabajos de investigación desarrollados para la consecución de la presente tesis y una breve descripción de los resultados obtenidos. Por último, se exponen los resultados y las principales conclusiones alcanzadas, y se proponen las líneas de investigación futuras que serán abordadas en base al trabajo de investigación realizado. La segunda parte del presente documento se estructura como un compendio de tres artículos de investigación. De los cuales dos de ellos se encuentran ya publicados en revistas científicas de alto impacto y calidad reconocida, indexadas en las bases de datos bibliográficas y bibliométricas ISI JCR (Journal Citation Reports), ISI WOS (Web of Science) e ISIS Scopus. Las publicaciones restantes son del tipo Congress Paper y capítulos de libro y se encuentran indexadas en las bases de datos bibliográficas y bibliométricas ISI WOS (Web of Science) y Scopus. Dichas aportaciones se han generado en el área del conocimiento donde se enmarca la presente tesis doctoral y conforme a la normativa de la Universidad de Jaén para la defensa de tesis doctorales (Extracto de los artículos del reglamento de estudio de doctorado de la Universidad de Jaén adaptada a las directrices del R.D. 99/2011 y aprobado en Consejo de Gobierno el 6 de febrero de 2012).



# CAPÍTULO 1: MEMORIA

## 1.1. INTRODUCCIÓN

Building Information Modelling se trata de una metodología de desarrollo de los proyectos de construcción basada en modelos CAD (Computer Aided Design) 3D mediante la cual se implementa en el sector una digitalización en la operación y mantenimiento de activos. Por eso, en cierta literatura, a esta tecnología se la reconoce también como Building information Management [1,2]. La metodología BIM supone una evolución en el diseño de los proyectos ya en su fase inicial, tradicionalmente basados en planos 2D, con la incorporación de información geométrica asociada a cada uno de los elementos presentes en un proyecto de construcción. Además, esta tecnología de trabajo colaborativa tiene como objetivo la centralización de toda la información creada por los agentes ligados al proyecto de construcción, abarcando no solamente la fase de diseño del mismo sino también las fases de ejecución, mantenimiento, gestión y tratando de reducir los costes de operación del mismo durante su vida útil.

La industria de la construcción a nivel europeo es un sector estratégico importante en términos económicos y de creación de empleo, no solo durante la fase de ejecución sino también en fases posteriores como gestión y mantenimiento de los productos ejecutados. Numéricamente el valor de la producción del sector se fija en unos 1.402 billones de euros [3,4] lo que supone un 10.6% del PIB aproximadamente y aglutina un total de trabajadores mayor a 12.7 millones de personas, de los cuales un 95% pertenece a pequeñas y medianas empresas [5]. Sin embargo, la industria de la construcción se encuentra, junto con el sector agrícola, a la cola en referencia a su grado de digitalización en comparación con otros sectores estratégicos. La apuesta por la digitalización de este sector y sus procesos de ingeniería derivados de la ejecución y explotación de las infraestructuras y edificaciones, supondrían de manera estimada un ahorro en costes, sólo en la fase construcción, de entre un 13-21% y de un 10%-17% en la fase de operaciones por proyecto. [6,7].

Las características fundamentales del sistema BIM se manifiestan en su capacidad para representar de manera tridimensional y paramétrica cada elemento de un proyecto de construcción. Esta representación digital proporciona una visualización detallada y precisa de la futura edificación, lo que facilita la toma de decisiones informadas en todas las etapas del ciclo de vida del proyecto. Además, BIM permite la colaboración en tiempo real entre diversos actores del proyecto, desde arquitectos e ingenieros hasta contratistas y gestores de instalaciones, lo que mejora la comunicación y reduce los errores costosos. Sin embargo, no podemos ignorar las limitaciones intrínsecas, como la

curva de aprendizaje asociada con la implementación de BIM y la necesidad de recursos tecnológicos adecuados.

El tratamiento de los datos y atributos asignados a cada uno de los elementos diseñados, siguiendo esta metodología de trabajo, para la elaboración de proyectos es también extrapolable a otros campos de la ingeniería como proyectos de ámbito industrial como puede ser un proyecto de molde de inyección o una nave industrial localizada en áreas destinadas a ello [8]. La construcción civil y la edificación han sido hasta hace pocos años, dos de las áreas con menor desarrollo tecnológico digital, en comparación con el ámbito industrial.

La metodología BIM para el desarrollo de proyectos está siendo fomentada por la Unión Europea. En este sentido el 26 de Febrero de 2014 se aprobó la “Directiva Europea European Parliament and Council 2014/24/EU” que impone la siguiente hoja de ruta en tres fases para todos los países miembros de la UE:

1. 12 de marzo de 2018: Uso recomendado de BIM en Licitaciones Públicas.
2. 17 de diciembre de 2018: uso obligatorio de BIM en Licitaciones Públicas de Edificación.
3. 26 de julio de 2019: uso obligatorio de BIM en Licitaciones Públicas de Infraestructuras.

En cuanto a la implementación nacional, en España, el Ministerio de fomento ya creó atendiendo al Real Decreto 1515/2018 de 28 de Diciembre de 2018 una Comisión interministerial para su progresiva implantación en la contratación pública. Esta comisión es denominada CBIM y actualmente pende del ministerio de transportes movilidad y agenda urbana [6].

El salto digital que supone el diseño de proyectos de construcción siguiendo la metodología BIM usando softwares CAD 3D con información geométrica de los elementos, es una de las principales razones para acuñar el término de construcción 4.0, concepto que nace asociado a la llamada industria 4.0 o Cuarta Revolución industrial. Este concepto plantea una visión del sector de la construcción como una industria manufacturera con el enfoque de la mencionada industria 4.0, interpretando las obras como fábricas y los procesos constructivos como procesos productivos. El impacto relativo a esta industrialización de la construcción ya ha sido tratado en la literatura científica, [9] en la cual se presentan ciertas potenciales guías de influencia tecnológica del sector industrial con aplicación en el ámbito de la ingeniería civil y edificación como son, en resumen [10]:

- REALIDAD VIRTUAL Y AUMENTADA. Las tecnologías inmersivas ofrecen recursos visuales que facilitan la toma de decisiones en obra, así como la mejoría de los flujos de información entre profesionales deslocalizados.

- **SIMULACIÓN.** La irrupción del BIM centraliza la información de las obras y brinda un marco común y aceptado por todos los actores para la virtualización y la simulación de diversos escenarios para la toma de decisiones.
- **INTEGRACIÓN VERTICAL Y HORIZONTAL.** La transformación digital del negocio mejora su integración, tanto a nivel de cadena de suministro como a nivel de producto.
- **INTERNET DE LAS COSAS.** La sensorización de las obras en sus diferentes fases pone a disposición multitud de información que se puede usar, tratada de forma adecuada, para la toma de decisiones en obra, o en el negocio.
- **BIG DATA.** Las nuevas técnicas para el tratamiento masivo de datos aprovechan el potencial existente en el aprovechamiento de la ingente de cantidad de los mismos que genera una obra.
- **COMPUTACIÓN EN LA NUBE.** Los inmensos recursos computacionales que ofrece actualmente la nube dan la oportunidad de tener información procesada en tiempo real y en cualquier sitio del mundo.
- **CIBERSEGURIDAD.** Las tecnologías basadas en 'blockchain' posibilitan la creación de nuevos modelos de negocio basados en el valor de las cosas y la construcción 4.0 puede aplicar esta tecnología, entre otras, para el desarrollo de nuevas formas de relación con la administración pública o para nuevos modelos de financiación de las obras.
- **ROBÓTICA.** La automatización de los procesos constructivos trae consigo nuevos equipos robotizados que pretenden reducir los índices de siniestralidad y mejorar sustancialmente la productividad en la Construcción 4.0.
- **IMPRESIÓN 3D.** Con la utilización de las impresoras 3D de materiales constructivos aparecen nuevas oportunidades relacionadas con la personalización, la fabricación in situ y la productividad y tiempo de respuesta.

En la línea de los dos últimos conceptos, la robotización y la tecnología de impresión 3D suponen, además de un adelanto en razones de seguridad, productividad y flexibilidad en las fases de diseño y ejecución de proyectos [11, 12], una ventana a la inclusión de nuevos materiales en el sector, que en tiempos anteriores hubieran sido de imposible aplicación, bien por falta de conocimiento sobre las características de los mismos, o bien por la incapacidad tecnológica existente durante etapas pasadas de la construcción para una correcta puesta en obra [13]. Este hecho es visiblemente notable con la llegada de la relativamente moderna tecnología de fabricación aditiva. Esta metodología de manufactura permite la producción de geometrías complejas de manera automatizada basándose en modelos de diseño CAD [14, 15].

Como método de fabricación, presenta grandes ventajas en diversos y valiosos términos como la automatización de la producción, la consecución de geometrías complejas que pueden ser contextualizadas al ámbito paisajístico, la sinergia de esta tecnología en cuanto a la creación de estructuras aligeradas desarrolladas en base a algoritmos de optimización topológica y una gran flexibilidad durante la fase de diseño del proyecto [16, 17]. Esta flexibilidad es una cualidad excepcional en

comparación con otros procesos de manufactura, puesto que sólo es necesario la modificación del CAD inicial para hacer patente las alteraciones o posibles cambios dentro del modelo diseñado. El tipo de metodología de trabajo asociada a estos diseños, denominado en la actualidad con el nombre de ingeniería inversa, conlleva disminuciones importantes en tiempos de diseño, producción y coste, independientemente del tipo de tecnología de fabricación aditiva elegida para la generación del proyecto dentro de las técnicas de impresión 3D desarrolladas en la actualidad [18].

Las geometrías diseñadas y ejecutadas a través de este método de fabricación son difícilmente replicables a nivel de coste o ejecución con la tecnología utilizada en el sector de la construcción hasta la fecha, como por ejemplo, y en casos de estructuras singulares, la elaboración de encofrados dedicados para hormigón referentes a un elemento de diseño constructivo. Además el tratamiento de los materiales durante la ejecución del diseño rompe con todo lo anterior, ya sea mediante las tecnologías FDM (Fused deposition modeling), SLA (estereolitografía/Stereolithography) o SLS (Selective Laser Sintering), posibilitando la inclusión de materiales poliméricos como alternativa de los materiales tradicionales para diversos usos tanto estructurales, autoportantes, modulares o mundanos [19].

Ciertamente la evolución de la tecnología y el conocimiento de los materiales polímeros ya han permitido la inclusión de los mismos en proyectos de construcción como alternativa a los materiales comúnmente utilizados en el sector. Así pues, uno de los casos más notables es la utilización de EFTE (Ethylene tetrafluoroethylene) empleado a gran escala en el centro acuático nacional de Pekín, más conocido como "WaterCube" inaugurado con razón de las olimpiadas de Beijing 2008.



Centro acuático de Pekín "WaterCube". A la derecha, detalle de las placas de EFTE utilizadas en su construcción.

Fuente: <https://structurae.net/en/structures/beijing-national-aquatics-center>

En concreto las características de este polímero lo convierten en un material más resistente, más eco-friendly, con mayor transmitancia al paso de la luz, más flexible y un 99% más ligero que el cristal [20]. En cuanto a obras lineales, en 2015 el gobierno de Rotterdam aprobó un proyecto piloto para la utilización de plásticos reciclados en forma de módulos rodoviarios que podrían sustituir al asfalto, potencialmente, en unos 50 años [21].



“Plastic roads” de VolkerWessels. A la derecha, detalle de la colocación de los módulos de carretera de plásticos reciclados. **Fuente:** <https://www.volkerwessels.com/en/projects/plasticroad>

En cuanto a lo que la tecnología de fabricación aditiva se refiere, aunque en el sector de la construcción se encuentra en etapas tempranas, ya se ha utilizado la tecnología FDM en diversos diseños y proyectos, y se ha demostrado posible la generación de módulos, submódulos o incluso estructuras completas en hormigón mediante este método de manufactura.

Dentro de la integración digital que supone la tecnología BIM para el diseño de proyectos, se reconocen en la literatura científica actual, desde su relativa reciente historia, una serie de niveles de digitalización en los proyectos de construcción desarrollados utilizando esta metodología, estos niveles digitales o escalones digitales se definen, dentro del argot técnico, como dimensiones BIM [22]. Es decir, atendiendo al nivel de integración digital en cada una de las fases del diseño de proyecto éste saltará de una dimensión a la siguiente. Aunque BIM es un campo que se encuentra en proceso de continuo crecimiento y desarrollo, en la actualidad se definen las siguientes dimensiones:

- 3D o Modelado: Diseño mediante software CAD 3D, del gemelo digital del producto.
- 4D o planificación: Evaluación temporal del proyecto, establece los plazos de los tiempos de ejecución del producto.
- 5D o costes: Evaluación económica, estimación y control de costes y rentabilidad a nivel monetario del producto.
- 6D o sostenibilidad del producto: Se refiere a la eco-eficiencia del diseño, Evaluación de la sostenibilidad (social, económica y ambiental).
- 7D o mantenimiento de producto: Define las guías de mantenimiento de la calidad una vez finalizada la manufactura del producto. Engloba inspecciones, reparaciones, costes de conservación y mantenimiento del mismo durante su vida útil.



Esquema y definiciones de las dimensiones definidas BIM. **Fuente:** <https://bimaula.com/blog/2020/08/14/dimensiones-bim/>

Si bien hasta la dimensión 4D, incluida ésta, la literatura científica parece haber estandarizado los niveles en cuanto a competencias y necesidades del diseño, no hay un acuerdo total dentro de las dimensiones 5D o superiores en este área de estudio. Así pues, ya se proponen nuevas dimensiones a incluir como, por ejemplo, 8D que estaría dirigida a la evaluación de riesgos laborales, aunque, y de nuevo según la literatura científica, los estándares de lo que una dimensión BIM engloba aún no se encuentran bien definidos, teniendo en cuenta además que algunos autores niegan la existencia de dimensiones mayores a 4D [23].

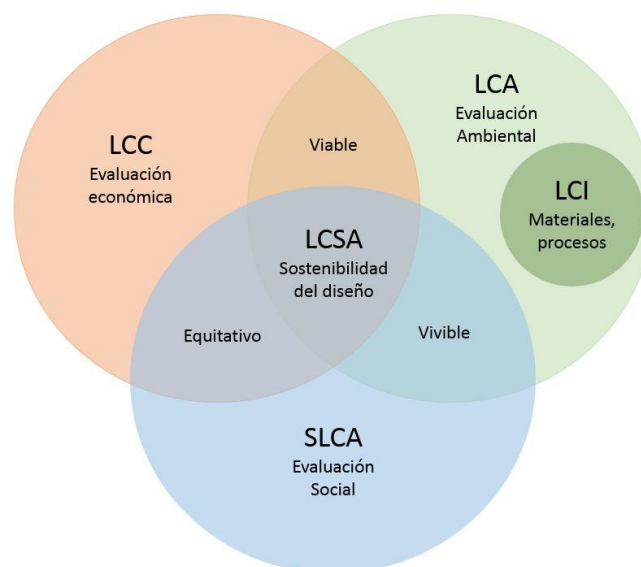
Una vez estructurada la realidad BIM, es importante ahora abordar los aspectos relativos a la sostenibilidad. Según el informe Brundtland\* (Informe “nuestro Futuro común” publicado por la comisión de medio ambiente de las naciones unidas, creada en 1983, en el año 1987, se llama informe Brundtland en honor a la presidenta de la comisión Gro Harlem Brundtland 1983-1987), documento donde por primera vez hay constancia del concepto de desarrollo sostenible, la sostenibilidad se define como “Aquel desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de satisfacción de las necesidades de las futuras generaciones”[24].

Desde un punto de vista del diseño de proyectos sostenibles, la literatura técnico-científica propone la separación del análisis de la evaluación de la sostenibilidad de un producto en tres ramas. La suma de estos pilares en su conjunto, conformarían por definición la Evaluación de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida de un producto, en inglés, Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) [25]. El LCSA estaría compuesto por el LCA (Life cycle Assessment) o evaluación del ciclo de vida, el LCC (Life Cycle Costing) o evaluación del ciclo de costes y por último el SLCA (Social Life cycle Assessment) o evaluación social del ciclo de vida.

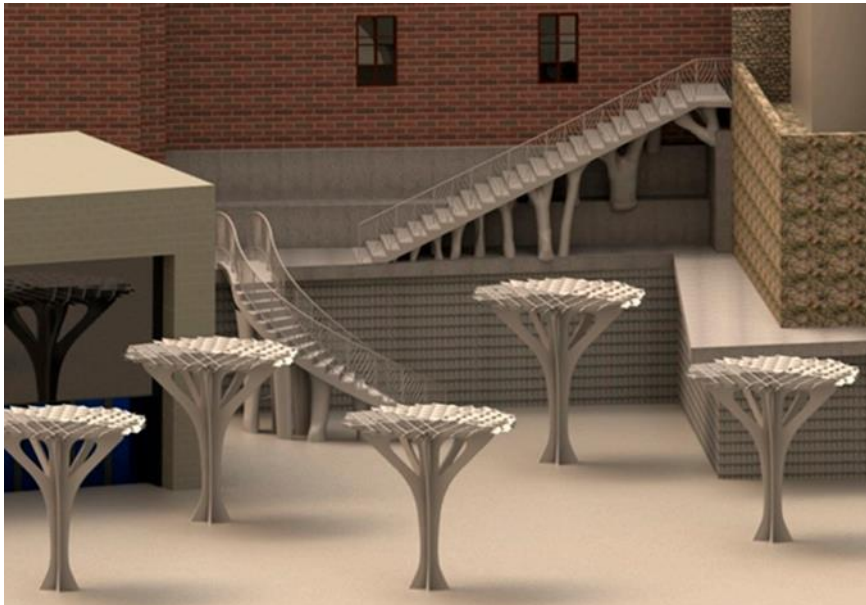
Estas herramientas de baremo o parámetros correspondientes a la evaluación de la sostenibilidad del ciclo de vida del producto, o LCSA, la más conocida y única en la actualidad estandarizada (ISO 14040 e ISO 14044) de manera internacional es el LCA. En el manual europeo ILCD handbook (International Reference Life Cycle Data System) [26] el LCA es definido como un método estructurado y completo que cuantifica todas las emisiones relevantes, los recursos consumidos, los posibles impactos ambientales y de salud relacionados, y además, los problemas de recursos asociados a cualquier bien o servicio.

Este análisis tiene en cuenta el ciclo de vida completo del producto desde la extracción de recursos, la producción del mismo, el uso y su gestión, el reciclaje y la eliminación de los residuos restantes. Es por tanto una herramienta importante para la toma de decisiones, que complementada con otros métodos igualmente necesarios, pretende ayudar de forma eficaz y eficiente a hacer más sostenible el consumo y la producción. El LCC se entiende como el soporte económico del LCA y complementa al mismo. Se podría definir como la práctica histórica y actual de muchos gobiernos y empresas y se basa en una evaluación puramente económica. Cuantifica los costes de producción de los recursos consumidos y los costes asociados a las distintas fases del diseño, producción, gestión y eliminación del proyecto.

Por último el parámetro SLCA hace referencia a la sostenibilidad social, como por ejemplo la comodidad del personal de trabajo, el salario a percibir por los mismos, etc. Convirtiéndose en una herramienta con difusos márgenes en su delimitación [25]. Como último concepto, pero no menos importante, para el análisis de la sostenibilidad de un diseño se expone el llamado Life cycle inventory (LCI), esta herramienta tiene como objetivo proteger el medio ambiente y ahorrar recursos, eligiendo, para el diseño y ejecución de los proyectos, materiales y procesos de producción sostenibles. El LCI se incluye dentro del estudio del LCA del proyecto y es una base fundamental para la sostenibilidad del producto entendida en toda la amplitud de definición en este párrafo descrita.



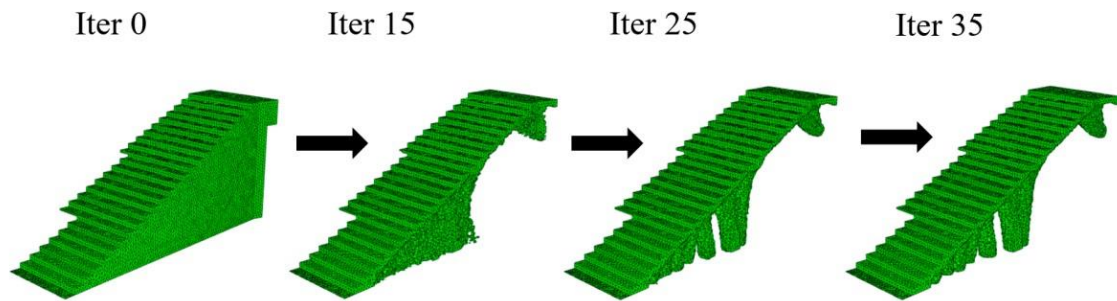
La línea de investigación de la tesis parte, de base, del diseño de un proyecto BIM [13]. Los elementos estructurales diseñados son autoportantes a modo de escalera que pretenden cuyo objetivo es salvar un desnivel de unos ocho metros y medio.



Reconstrucción digital final de los elementos BIM proyectados. **Fuente:** Polymers

Los factores decisivos planteados para la concepción del diseño son, en primer lugar, la necesidad de integrar la arquitectura de los elementos BIM en concordancia con la distribución de espacios de la ubicación. El llamado diseño contextualizado del proyecto pretende conseguir la armonía visual y espacial del entorno, ser estéticamente agradable y aportar una apariencia moderna y natural mediante los productos diseñados.

En segundo lugar, la elección de una tecnología de diseño debe permitir una utilización de material, en cantidad, sostenible. La premisa del ahorro de cantidad de material es uno de los requisitos englobados en la definición de sostenibilidad, para lograr este hito, los diseños de los elementos estructurales BIM se desarrollan en base a la tecnología de optimización topológica o diseño generativo. Este algoritmo de optimización se encarga de depurar la cantidad de material utilizada, eliminando las partes del producto que, en este caso, no son esenciales estructuralmente, es decir que no trabajan a nivel resistivo [27].



Ejemplo de aplicación de algoritmo de optimización topológica de un elemento BIM. **Fuente:** Polymers

Además del ahorro de material conseguido mediante la aplicación de este algoritmo de optimización para el cálculo estructural, otorga a los elementos BIM un diseño geométrico de aspecto visual en forma arborescente y natural, que concuerda en gran nivel con el objetivo de diseño contextualizado de la primera premisa planteada. De esta segunda hipótesis para el diseño y desarrollo del proyecto deriva la tecnología de manufactura empleada para la producción de los elementos.

Debido a la singularidad geométrica presentada en los diseños de las escaleras, su dificultad técnica y el coste económico referidos a la ejecución de los productos, mediante los modelos de producción convencionales en la industria de la construcción, se opta por la robotización y automatización de los procesos en la fase de fabricación, apostando por la tecnología de fabricación aditiva FDM, que se postula más asequible tanto técnica como en términos de reducción de costes económicos y de tiempos de ejecución [28,29,30]. La utilización de esta técnica permite la creación de objetos tridimensionales capa por capa, ofreciendo una flexibilidad de diseño sin precedentes dentro del sector y la capacidad de utilizar materiales plásticos innovadores. No obstante, su aplicación en el contexto de la construcción y la industria es un objetivo desafiante y requiere de una integración efectiva con herramientas como el BIM para alcanzar su máximo potencial.

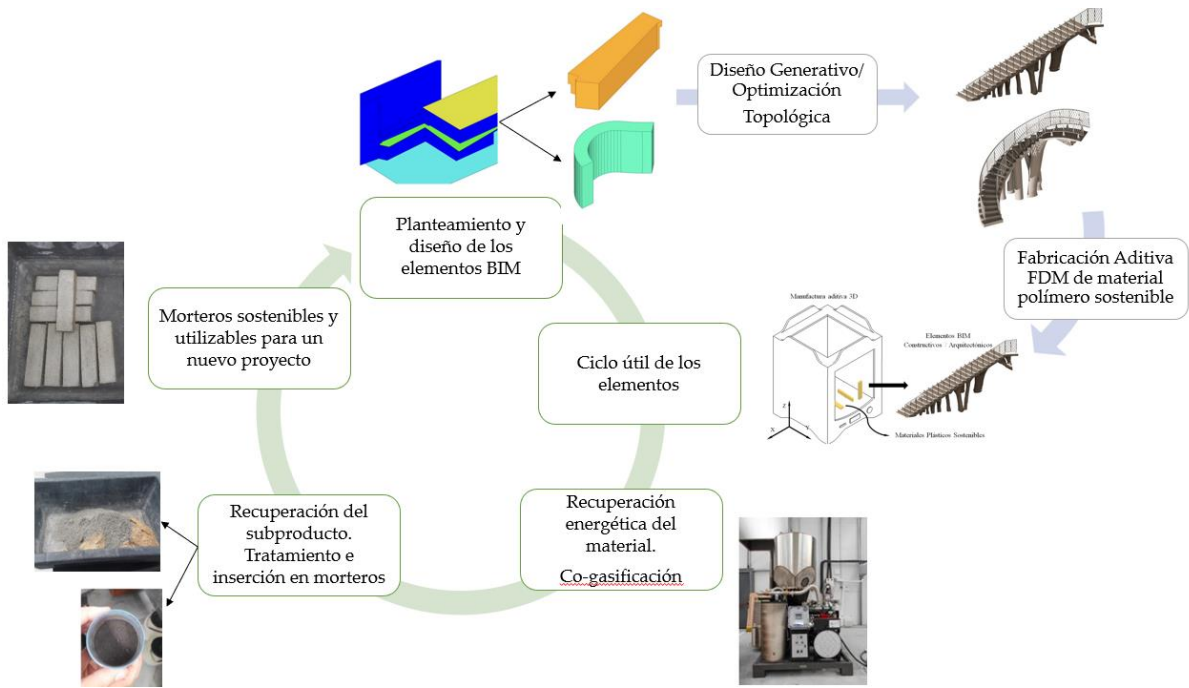
Finalmente, como último factor en el diseño del proyecto, y en consecuencia de los mencionados criterios de sostenibilidad, definidos anteriormente. La aplicación de la metodología BIM en coordinación con procesos constructivos sostenibles, como la fabricación aditiva con plásticos reciclados o biodegradables, plantea una perspectiva novedosa para lograr proyectos que sean económicamente viables y, al mismo tiempo, responsables con el entorno. En cuanto a la elección del material de los elementos BIM debe también responder a las siguientes problemáticas: Por un lado, el material, debe de cumplir con las especificaciones necesarias a nivel estructural y soportar las solicitaciones y deformaciones asociadas al uso para el cual han sido concebidos los diseños, incluidas también las condiciones climáticas como la exposición solar durante

el ciclo de vida y demás derivadas, como consecuencia de su emplazamiento a la intemperie. Por otro lado, y basado en la sostenibilidad del producto y el ciclo de vida del material elegido, debe de ser recuperable en la medida de lo posible, ya sea a través de una revalorización energética o bien otro tipo de reciclado o reutilización de los subproductos producidos tras la eliminación de los elementos al finalizar su puesta en servicio. Además, y como último requisito, el material debe de ser ejecutable mediante la tecnología de fabricación elegida, tecnología de fabricación aditiva en este caso. Por tanto, tras el análisis de estos criterios, tanto de producción y procesado, como de sostenibilidad, se opta por seleccionar PETG (Polyethylene terephthalate glycol) o poliéster de glicol, un material polimérico cuyas propiedades mecánicas y físicas se adaptan y cumplen las necesidades del diseño planteado [31, 32].

En referencia a la metodología BIM para la elaboración de proyectos de construcción, tanto el proceso de fabricación seleccionado, la fabricación aditiva, y el material seleccionado para la manufactura del diseño, PETG, forman parte del estudio del LCA del proyecto. Dentro de la sostenibilidad, son evaluados parámetros importantes como la energía utilizada en la fase de ejecución, la disponibilidad del material, su ciclo de vida y revalorización del mismo [33]. Por tanto, y ligado a este fin, la línea de investigación de esta tesis continua con el estudio de la recuperación energética [31] de los materiales asociados a la construcción de los elementos BIM diseñados y la inclusión de los subproductos obtenidos dentro de la economía circular en el sector de la construcción. En este contexto, la metodología BIM desempeña un papel crucial al proporcionar una base de datos detallada de los materiales utilizados en un proyecto, lo que facilita la identificación y recuperación de recursos valorizables. La valorización de subproductos y la economía circular adquieren en este punto una importante relevancia.

La capacidad de recuperar y reutilizar los materiales de construcción en forma de subproductos, se alinea con los objetivos de sostenibilidad y eficiencia de esta tesis enfocada en energías renovables. Con el objetivo de alargar así la vida útil del producto y tomando como uno de los principales objetivos la sostenibilidad del proyecto desde su inicio en el diseño, pasando por la fase de ejecución, hasta la eliminación de los elementos BIM tras cumplir el ciclo de servicio para el que son concebidos [32].

Para finalizar esta sección, en este trabajo de investigación se recorre una línea de intersección entre los elementos BIM, fabricación aditiva en plástico, sostenibilidad y valorización. Allanando el camino entre estas disciplinas a priori dispares pero que pueden converger e impulsar la creación de edificaciones más eficientes, sostenibles y económicamente viables, con el objetivo de que, en el futuro, la construcción ecológica sea la norma.



**Diagrama de flujo.** Alcance y línea de investigación desarrollados en este documento de tesis. **Fuente:** Elaboración propia.



## 1.2. JUSTIFICACIÓN

En el contexto de la ingeniería civil y la arquitectura, las metodologías y técnicas actuales para el diseño y construcción de elementos constructivos y arquitectónicos presentan limitaciones significativas que requieren atención [34]. Estas limitaciones incluyen la falta de una representación detallada y tridimensional en las etapas iniciales del diseño, así como la escasa consideración de criterios sostenibles y eficientes en la selección de materiales y procesos constructivos.

La metodología BIM representa el impulso del sector de la construcción hacia la digitalización y una buena oportunidad de hacer frente a desafíos estructurales del sector aprovechando la disponibilidad de mejores prácticas desarrolladas en otros sectores industriales, tanto a nivel de herramientas y métodos de producción como de automatización de las tareas [33] [35]. También, el trabajo colaborativo que supone la implantación de esta tecnología de gestión, favorece la especialización y mayor cualificación de los trabajadores y de las empresas participantes en el desarrollo de los productos [36].

Por otro lado, la adopción de BIM en el proceso de diseño supera la limitación de la representación bidimensional predominante en la ingeniería civil en las primeras etapas del diseño, lo que limita la precisión y la capacidad de tomar decisiones informadas [37]. El uso de BIM proporciona una representación tridimensional paramétrica que facilita una comprensión más completa de la futura estructura añadiendo un filtro extra, además, en la comprobación de la veracidad y exactitud en sus mediciones [38].

Este salto tecnológico en el diseño arquitectónico, provocado por el paso del convencional trabajo sobre plano 2D al trabajo tridimensional, pone de manifiesto una revolución que posibilita la entrada en el sector de nuevos softwares CAD 3D. Estos programas, generalmente utilizados en sectores industriales como el industrial y el aeronáutico, presentan ventajas significativas en cuanto a la precisión de la geometría del diseño y la capacidad para un mayor nivel de desarrollo en los elementos a definir [39]. Esta parametrización de los elementos los hace más potentes y seguros a la hora de seguir metodologías modernas de trabajo como la ingeniería inversa y tienen una mejor sintonía con los softwares de simulación de esfuerzos y solicitaciones [40]. Además, estos programas permiten la incorporación de nuevas metodologías de fabricación, como la fabricación aditiva o piezas creadas a partir de moldes de inyección, que pueden alterar la implementación de nuevos materiales dentro del sector.

En conjunto, la adopción de BIM y la integración de software CAD 3D en el proceso de diseño suponen un paso adelante en la superación de las limitaciones actuales en la ingeniería civil y la arquitectura, permitiendo una representación más precisa, una

toma de decisiones más informada y la exploración de tecnologías y materiales innovadores.

En la actualidad los softwares CAD dedicados a la gestión de la metodología BIM carecen de la potencia de diseño que los concebidos para el trabajo en el diseño de piezas industriales o aeronáuticas [41]. La comunicación con los software CAE apenas está optimizada de manera que la pérdida de información en la geometría es habitual. Esto imposibilita la generación de elementos o familias de elementos BIM cuya metodología de fabricación no sea la convencional dentro del entorno. Además de la imposibilidad geométrica de creación, debido a la falta de adecuación del software a metodologías de manufactura como la fabricación aditiva o los moldes de inyección. Otra problemática grave se encuentra en el salto al 4D y el 5D. Estos softwares BIM no están preparados para realizar unas mediciones y presupuestos automatizados para los elementos manufacturados fuera de lo convencional. Entre otros factores, los más evidentes son la pérdida de información en la importación de objetos o superficies y la nula adaptación de las partidas presupuestarias a unas mediciones que difieran de las magnitudes métricas básicas, longitud, área y volumen. Es decir, para el diseño de elementos BIM distintos de los convencionales, ya sea debido a la tecnología de fabricación o por el diseño singular de la pieza, geometría compleja con huecos o curvas alabeadas, los programas CAD de gestión BIM son, por norma general, deficitarios [13].

Sin embargo, la innovación va más allá de la etapa de diseño. La fabricación o implantación real de los elementos constructivos se lleva a cabo mediante procesos industriales novedosos, como la fabricación aditiva, combinada con el uso de materiales poliméricos plásticos sostenibles. Esto aborda otra debilidad crítica en la industria, que es la falta de métodos de construcción eficientes y sostenibles [42]. La fabricación aditiva ofrece la posibilidad de crear estructuras complejas con un mínimo desperdicio de material y un alto grado de personalización, superando las limitaciones de los métodos tradicionales.

En términos de sostenibilidad, la tecnología BIM junto con los nuevos métodos de fabricación automatizados brindan la oportunidad de mejorar la calidad y los costes de producción, tanto económicos como medioambientales [43]. Es un hecho que la digitalización en la fase de diseño impuesta al sector por medio de esta metodología y la comunicación de los softwares CAD de gobierno con los software CAE, ayudarán a predimensionar estrategias y medidas sostenibles que afectarán al producto durante todas sus fases del ciclo de vida. La inversión de mayor tiempo en la fase de diseño requerido por esta metodología y la capacidad de analizar al gemelo digital en sus vertientes energéticas, también en términos de eficiencia, de materiales e impacto en el territorio, a priori, gracias a los programas de simulación, serán soportes muy útiles en la operación de toma de decisiones [44].

Igualmente, la incorporación de los nuevos métodos de fabricación, como la aditiva o inyección mediante moldes, permitirán la entrada a materiales, dentro del sector, más

sostenibles. Ya sean poliméricos o no, ayudarán a abrir un abanico más amplio de posibilidades al diseñador del producto a la hora de proyectar el elemento BIM. Esto otorga al gestor del diseño la capacidad de evaluar el producto en una escala temporal más allá que la planteada por la vida útil del elemento desde sus fases iniciales, pudiendo plantear medidas eficientes y sostenibles desde su fase de ejecución hasta la fase de eliminación del mismo.

Los polímeros, dentro del campo de la tecnología de materiales, presentan uno de los mayores rangos de propiedades y aplicaciones en la industria. Son ligeros, químicamente estables, elásticos y presentan un buen rendimiento como aislantes térmicos y eléctricos. Resuelven fácilmente problemas de filtraciones de agua y son un arma potente contra la erosión y la corrosión química y ambiental. Sus métodos de fabricación son flexibles y eficientes, y la materia prima de procedencia para su fabricación es barata (carbón, derivados del petróleo, residuos procedentes de la madera o agricultura, etc.) lo que los hace económicamente muy rentables. Es por lo cual, que su crecimiento en el sector de la construcción en las últimas cuatro décadas ha sido muy importante [45]. La evolución de los plásticos y sus buenas y variadas propiedades han hecho que su producción se haya disparado en los últimos 50 años, así en el año 2013 se generaron del orden de 300 millones de toneladas de polímeros y en 2020 según las estimaciones se llegaron a producir 500 millones de toneladas, lo que supone un aumento de un 900% de crecimiento en niveles de producción en comparación con la década de 1980 [46].

Tomando en cuenta estos datos, es obligación del diseñador o proyectista del producto, dentro del estudio LCSEA, una valoración para la correcta eliminación de los residuos y su inserción dentro de la economía circular.

El elevado calor específico del plástico lo convierten en un buen material para ser utilizado como combustible de manera directa o como una fracción en la elaboración de otros combustibles [47]. Estos combustibles mixtos en combinación con la biomasa pretenden, mediante un proceso de co-gasificación térmica, paliar por el momento a pequeña escala, el impacto medioambiental que supone la obtención de energía a través de centrales térmicas (hidrocarburos y carbón). Existen ya artículos científicos de alto impacto que recomiendan este proceso de recuperación termoquímica como un sistema apropiado para la revalorización de materiales residuales mediante la producción de syngas. [48,49]. Este gas de síntesis o syngas de gran potencial energético sustituirá en parte a los hidrocarburos y derivados en la producción de energía buscando una desaceleración en las consecuencias de la amenaza que constituye el calentamiento global.

Por ello, la gasificación térmica puede perfectamente ser una solución para la recuperación energética del material plástico que conforma los productos BIM referentes a esta tesis. Esta tecnología se basa en la oxidación parcial a altas temperaturas del combustible, generalmente entre los 800 y 1000 °C [50]. Así pues esta tesis plantea la recuperación del material de los elementos BIM diseñados mediante,

primeramente, el método de incineración o Energy recovery, es decir, una ruta de recuperación del plástico basada en la recuperación de energía en forma de calor [51], a través de la gasificación térmica del polímero en combustibles compuestos con biomasa y, en segundo orden, el aprovechamiento de los subproductos derivados de esa gasificación térmica para la inclusión de las cenizas, previamente tratadas, en morteros de cemento [32].

Finalmente, la presente tesis doctoral garantiza un ciclo de vida completo sostenible y renovable. La gestión de residuos se aborda mediante un proceso de co-gasificación que no solo reduce la acumulación de desechos, sino que también genera energía, abordando así la falta de enfoques renovables y sostenibles en la gestión de residuos en la construcción [42].

En resumen, el trabajo de investigación desarrollado representa una innovación significativa al mejorar las técnicas y metodologías existentes en la ingeniería civil y la arquitectura. Al abordar las debilidades actuales en el diseño, la fabricación y la gestión de residuos, esta tesis propone un enfoque integral que promete una mayor eficiencia, sostenibilidad y responsabilidad medioambiental en la industria de la construcción.

## 1.3. OBJETIVOS

La finalidad de la tesis doctoral presentada es la aplicación y adaptación de la tecnología BIM a la fabricación aditiva y moldeo por inyección de plástico. El desarrollo de una metodología que enlace estos nuevos métodos de fabricación tanto para la introducción en el entorno BIM de geometrías, en consideración con la dimensión 3D, como para la gestión de los datos geométricos y atributos asociados en la dimensión 4D para proyectos de construcción. Es decir, una metodología de importación/ exportación y gestión de geometrías y datos asociados para la creación de los elementos BIM utilizando métodos de manufactura de carácter industrial. Y también la eliminación de carácter sostenible de dichos elementos, que finalizará con la inserción de los residuos materiales polímeros en la economía circular dentro del sector de la construcción en forma de morteros. Se trata pues de un acercamiento entre metodologías de diseño, manufactura y flujos de trabajo de carácter marcadamente industrial y el salto digital que supone BIM al ámbito de la ingeniería civil y de la edificación. Para alcanzar esta propuesta se han establecido los siguientes objetivos intermedios:

- **Diseño de elementos estructurales contextualizados y sostenibles.** Para el diseño del gemelo digital BIM de las soluciones estructurales planteadas, se parte de una nube de puntos del entorno digitalizados y obtenidos mediante tecnología de fotogrametría terrestre. Una vez corregidos los errores de cálculo y precisión derivados de la misma, contrastando la información geométrica digital obtenida en la fotogrametría con medidas realizadas in situ, se realiza la consiguiente reconstrucción de la malla digital basada en los resultados de la nube de puntos. El principio de sostenibilidad en la producción del producto, análisis de LCI en primer lugar, abre la puerta a la utilización del material polímero PETG como base del proyecto porque además de poder ser en parte recuperado mediante un proceso de recuperación energética, lo que supone una reducción en el LCC del diseño, la dificultad geométrica que precisan las estructuras diseñadas contextualmente con el terreno son abordables, desde un punto de vista económico y de ejecución, de una manera más sencilla y eficiente a través de las nuevas tecnologías de manufactura asociadas en este caso al campo de la edificación.
- **Planteamiento de un diseño de elemento BIM estructural basado en las nuevas tecnologías de manufactura automatizadas.** El diseño contextualizado y el ahorro de material, hacen que el diseño de los elementos BIM estén basados en un algoritmo de optimización topológica, este algoritmo de carácter estructural reduce al mínimo el material utilizado cumpliendo, evidentemente, las solicitaciones mecánicas y estructurales necesitadas para el correcto funcionamiento del producto durante su vida útil. El diseño por tanto presenta una forma muy natural e irregular debido a las solicitaciones de uso y las

condiciones de contorno marcadas por el terreno en el que se pretende ejecutar el diseño. Este tipo de estructura aligerada de forma arborescente conlleva unos costes y una dificultad técnica de ejecución elevados para la utilización de la tecnología de fabricación convencional en el sector de la construcción. El paradigma planteado, hace escoger como proceso de manufactura la fabricación aditiva que además de ser compatible con el material polímero seleccionado, reproduce de manera más eficaz las geometrías irregulares descritas por los diseños basados en el algoritmo de optimización topológica.

- **Validación del proyecto mediante simulaciones virtuales y análisis de la viabilidad del mismo.** Una vez diseñados los productos atendiendo a las hipótesis de ahorro de material y contextualización con el entorno, además de la consiguiente elección del material para su fabricación, es el momento de, mediante el proceso de ingeniería inversa, su validación estructural para certificar numéricamente la bondad de la alternativa, tanto a nivel de diseño como de fabricación, seleccionada. Para ello se utilizan los programas CAE para el cálculo de esfuerzos y resistencias mecánicas. Las geometrías son introducidas en estos softwares y son comprobadas tanto las resistencias mecánicas de los productos como las deformaciones más relevantes a nivel estructural incluyendo las flechas máximas debidas a las cargas de utilización. El software CAE utilizado para este objetivo se denomina ANSYS dentro de su módulo dedicado a la resistencia estructural. En el estudio se evaluaron las cargas derivadas de las normativas así como los puntos de anclaje o empotramiento de los que constaban en los elementos BIM de carácter estructural. El funcionamiento de este software CAE se basa en la discretización de los elementos y aplicando la computación mediante la teoría de elementos finitos calcular para cada uno de los nodos, desplazamientos y giros consiguiendo por tanto, mediante las ecuaciones de gobierno del algoritmo, los citados desplazamientos en cada nodo así como los esfuerzos a los que la estructura diseñada se encuentra sometida.
- **Planteamiento de nuevos modelos de medición para una gestión de datos geométricos optimizada, que cubran las necesidades y se adapten mejor a las tecnologías de producción automatizadas que las convencionales ofrecidas en el entorno BIM.** Uno de los grandes retos de la metodología BIM y de la construcción en general es la correcta introducción de nuevos métodos de fabricación desarrollados normalmente para servir en otros sectores. Un ejemplo de ello son la fabricación aditiva y el moldeo por inyección. En la actualidad los softwares BIM no se encuentran preparados para la correcta interpretación de geometrías o métodos de fabricación que difieran en cuanto a la medición presupuestaria de los cánones establecidos tradicionalmente. Aun reconociendo las propiedades geométricas referidas a los elementos singulares BIM introducidos en el software, longitud, superficie y volumen, los métodos computacionales de medición del programa no están preparados para la extracción de datos presupuestarios coherentes asociados con el método de

producción en este caso elegido. Por tanto, es necesario un análisis de las estructuras singulares y dotar de nuevas variables a los ficheros, entre los que se encuentren variables relacionadas con la fabricación aditiva como son la altura de capa, la velocidad de extrusión, el diámetro de extrusión, el coste de unidad de operación, entre otros, Para que los resultados obtenidos dentro de la tecnología y software BIM sean veraces con respecto a la realidad del diseño.

- **Evaluación de la recuperación de los residuos derivados una vez alcanzado la vida útil del producto (valorización energética y reaprovechamiento de subproductos “economía circular).** Aunque dentro de las hipótesis del proyecto anteriormente descritas en este documento que de manera directa apuntan a la sostenibilidad del diseño en todas las fases del producto, es necesario también el estudio y análisis de la recuperación de los materiales utilizados una vez finalizada la vida de servicio del mismo, dotando a los materiales empleados de una segunda oportunidad dentro del sector de la construcción u otros sistemas de producción. La economía circular planteada para los productos residuales derivados del polímero utilizado en la fabricación de los elementos estructurales BIM pasan por dos etapas bien reconocidas. La primera es la revalorización energética del material mediante un proceso termoquímico llamado gasificación. En este caso el proceso utiliza como combustible el PETG en conjunción con biomasa para obtener gas de síntesis o syngas de alto valor energético y alto contenido en hidrogeno, que se puede reutilizar para la producción de electricidad y almacenable. Por otro lado y para terminar de introducir los subproductos obtenidos tras la gasificación del material de residuo, se propone una metodología de inserción de las cenizas inertes producidas durante la quema del combustible de la gasificación y su introducción en morteros de construcción como sustitutos parciales del Clinker de cemento. De esta manera, en esta doble etapa de recuperación además de una evidente repercusión en el LCC del producto se justifica la elección del LCI asociado, el material polímero PETG, y en balance total la sostenibilidad de los elementos estructurales diseñados en BIM queda asegurada.



## 1.4. PUBLICACIONES

En este apartado se comentan las publicaciones relevantes, artículos en revistas de alto impacto, comunicaciones de congresos y capítulos de libro que surgen a partir del trabajo de investigación realizado para la consecución de los objetivos anteriormente descritos en la presente tesis doctoral.

1. Diaz-Perete D., Mercado-Colmenero J.M., Valderrama-Zafra J.M., Martín-Doñate C. "New Procedure for BIM Characterization of Architectural Models Manufactured Using Fused Deposition Modeling and Plastic Materials in 4.0 Advanced Construction Environments". *Polymers*. 2020; 12(7):1498. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12071498>.

En este artículo se presenta la solución frente a un problema de continuidad vial interurbano en la ciudad de Jaén. Se pretende salvar un desnivel de 8.541m (en dos tramos de 3.633 y 3.908m) dotando de accesibilidad a una calle, actualmente sin salida, hacia la localización de una plaza situada en el nivel inferior. Se proponen, diseñan y verifican, mediante simulación de software CAE, dos elementos estructurales tipo BIM a tal efecto, bajo las siguientes premisas o condiciones de contorno:

En términos de servicio, los dos objetos BIM diseñados cumplirán con la normativa y especificaciones técnicas relevantes para su correcto dimensionamiento, funcionalidad y segura utilización contenidas en el código técnico de la edificación española.

En términos de sostenibilidad, los objetos diseñados estarán integrados dentro de las dimensiones 3D y 4D de la metodología BIM, teniendo en cuenta también las necesidades dependientes para su futura implantación de las dimensiones 5D y 6D, aunque no se encuentran aplicadas en el momento. En otras palabras, la elección de LCI, es decir, el material y la metodología de manufactura deberán ser eficaces, eficientes y en el caso de los materiales, éstos serán recuperables dentro de la economía circular. Además, las geometrías asociadas a los objetos BIM creados para la solución del problema deberán integrarse dentro del software dedicado a este uso, automatizando mediciones y costes de los mismos una vez que la importación del diseño CAD sea efectiva. En este ámbito descrito, se elige la fabricación aditiva como tecnología de fabricación automatizada y el PETG como material de diseño por su fácil ejecución mediante esta tecnología. También se pondera la capacidad de reutilización del material una vez eliminada la obra. Para el ahorro del material los diseños BIM se realizan mediante optimización topológica y finalmente se verifican y validan los resultados obtenidos frente a las solicitudes propuestas mediante un software de tipo CAE.

En términos de impacto visual, la optimización topológica y el diseño contextual de los elementos otorgan a los objetos tipo BIM de un aspecto agradable dentro del entorno de ejecución.

2. Díaz-Perete D., Hermoso-Orzáez M.J., Carmo-Calado L., Martín-Doñate C., Terrados-Cepeda J. "Energy Recovery from Polymeric 3D Printing Waste and Olive Pomace Mixtures via Thermal Gasification—Effect of Temperature". *Polymers*. 2023; 15(3):750. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15030750>

En este artículo se presentan las pruebas experimentales para la revalorización energética de los residuos derivados de la utilización del PETG como materia prima tras manufactura en el ámbito de la tecnología de fabricación aditiva FDM. La gasificación como solución alternativa para la valorización energética del PETG y de otros polímeros, presenta ciertas ventajas medioambientales frente a otro tipo de tratamientos como la combustión, ya que el proceso de gasificación libera a la atmósfera menores cantidades de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>. En el caso de estudio presentado en este manuscrito, el gas de síntesis obtenido presenta buenos resultados debido a que el contenido de plástico en los combustibles eleva el poder calorífico superior (HHV) del gas de síntesis alcanzando 40,7 MJ/Kg frente a los 20,3 MJ/kg obtenidos con combustible 100% biomasa derivada del hueso de aceituna. Además, a temperaturas superiores a 750 °C, los combustibles compuestos por combinación de residuos PETG para impresión 3D y biomasa producen gas de síntesis con valores de rendimiento mayores, en torno al 14% en el mejor de los casos, en comparación con el combustible compuesto exclusivamente por biomasa. Por último, incluir materiales poliméricos de impresión 3D en el contexto de la economía circular y extender su ciclo de vida ayuda a mejorar la eficiencia de los procesos industriales posteriores, reduciendo los costes de los procesos en general, gracias al nuevo valor industrial que adquieren los subproductos generados. El gas de síntesis de alta energía obtenido en la gasificación también alivia al sector productor de energía, ofreciendo una vía alternativa hacia un futuro más limpio y sostenible.

3. Díaz-Perete D., Hermoso-Orzáez, M. J., Terrados-Cepeda, J., Silva-Romano, P., & Martín-Doñate, C. (2023). WEEE polymers valorization, its use as fuel in the gasification process and revaluation of the inert by-products obtained: Sustainable mortars as a solution. *Heliyon*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20194>

En este manuscrito se presenta una metodología para la revalorización de los residuos obtenidos tras la gasificación de combustibles mixtos, formados por plásticos derivados de WEEE (RAEE en español, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos) ampliando el ciclo de vida de estos subproductos y proponiendo su inserción dentro de la economía circular en el ámbito de la construcción. Mediante el proceso termoquímico de la gasificación, por un lado, se obtiene gas de síntesis de alto valor energético, con elevada concentración de hidrógeno, por otro lado, se generan productos de desecho en forma de cenizas y escorias. Este manuscrito es un estudio que presenta una metodología detallada, que parte del análisis químico de la materia prima e incluye el posterior análisis de los resultados mecánicos, para la revalorización

de estos subproductos inertes residuales utilizándolos en la elaboración de morteros de construcción como sustitutos parciales en escoria de cemento. Esta metodología descrita influye directamente en el LCC (Life Cycle Costing) de los productos finales diseñados en plástico y alarga el ciclo de vida del material. Los materiales plásticos se encuentran en la mayoría de las actividades diarias desarrollados por el ser humano promedio, por lo que, el estudio y optimización de los procesos de valorización de residuos de polímeros es una vía vital para alcanzar los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) marcados por la Unión Europea en materia de eficiencia y sostenibilidad.

### Conference papers

3. Diaz-Perete, D., Mercado-Colmenero, J.M., Torres-Alba, A., Martin-Doñate, C. (2021) Aplicación de análisis dimensional y escalado para el diseño de un elemento constructivo tipo BIM. Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Anales de ingeniería Mecánica-Revista de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica, Año 22, Jaén, octubre 2021

En esta comunicación a congreso nacional, se emplea el teorema  $\pi$  de Buckingham para la determinación de los parámetros principales que relacionan los modelos reales y modelos a escala de elementos constructivos parametrizados de tipo BIM. La geometría, escenario de cargas y condiciones de contorno de estos modelos se diseñan virtualmente para validar los requerimientos funcionales y estructurales que relacionan los modelos propuestos con el elemento estructural parametrizado de tipo BIM objeto de estudio. La manufactura de modelos a escala reducida es un recurso ampliamente utilizado para el diseño, dimensionamiento y validación de elementos constructivos con grandes dimensiones. El análisis experimental a escala real de éstos se encuentra principalmente limitado por la capacidad tecnológica para reproducir los escenarios de cargas y las condiciones de contorno al que están sometidos, junto al elevado coste económico, temporal y espacial asociados a la manufactura del prototipo y su posterior experimentación. El empleo de la metodología propuesta en la presente comunicación permite reducir y optimizar tiempos y costes asociados a las fases iniciales de diseño y dimensionamiento de elementos constructivos con grandes dimensiones.

4. Diaz-Perete, D., Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J.M., Martin-Doñate, C. (2020). Plates Pre-dimensioning for Injection Molds by Using Computational Design and Inclusion of the Parts in BIM Methodology. In: Cavas-Martínez, F., Sanz-Adan, F., Morer Camo, P., Lostado Lorza, R., Santamaría Peña, J. (eds) Advances in Design Engineering. INGEGRAF 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-41200-5\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41200-5_59)

En este capítulo de libro se presenta un algoritmo de automatización para el predimensionamiento de placas de moldes de inyección en base a las medidas de la pieza a fabricar y de acuerdo con los requisitos específicos de presión obligatorios para la inyección y fabricación de dicha pieza. Las placas parametrizadas son: la placa

cavidad, la placa núcleo y la placa soporte. Además, las ecuaciones utilizadas se introducen en un software de diseño computacional paramétrico (Generative Components) vinculando cada variable de las ecuaciones de gobierno con su parámetro correspondiente con el fin de generalizar el proceso de diseño de moldes de inyección para piezas de plástico simples. Después del proceso de cálculo y el predimensionamiento de las placas, se introduce la geometría final en el entorno BIM utilizando un software destinado a tal efecto (AecoSim Building Designer). Este Software automatiza las mediciones de las cantidades de material requerido para la fabricación de las placas mencionadas, teniendo en cuenta información como el número de cavidades de pieza por placa y la dimensión de las mismas para obtener el control presupuestario automático.

5. Diaz-Perete, D., Hermoso-Orzaez, M.J., Carmo-Calado, L., Mota-Panizio, R., Brito, P. (2023). Analysis of the Mechanical Behaviour of Modified Mortars with Ash Residues from Biomass Gasification with WEEE Plastics. In: , et al. Proceedings of the 2nd International Conference on Water Energy Food and Sustainability (ICoWEFS 2022). ICoWEFS 2022. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6_14).

Este capítulo de libro presenta un estudio para la recuperación de subproductos inertes residuales derivados del proceso de gasificación de biomasa y su uso en la producción de morteros para reemplazar los áridos de cantera comúnmente utilizados en la producción de hormigón y mortero. Incluye una comparativa del comportamiento frente a la resistencia mecánica a compresión uniaxial entre morteros modificados versus morteros estándar utilizados habitualmente en la edificación para dotar de una segunda vida a una fracción de los materiales residuales producidos durante el proceso de gasificación, manteniendo la línea de sostenibilidad y eficiencia en materia de gestión y reciclaje de residuos.

# 1.5. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

La presente tesis doctoral está compuesta por un conjunto trabajos de investigación, relativos a la digitalización y sostenibilidad en el diseño de los productos dentro del ámbito de la ingeniería civil, con la consecuente implementación de la metodología BIM para un proceso constructivo en base a tecnologías de manufactura industriales. Es también un puente multidisciplinar que relaciona las incipientes tecnologías de gestión de productos ofrecidas en el sector de la construcción atribuidas a la tecnología BIM y su el diseño de producto conforme a otros ámbitos de producción como el diseño industrial. Cuenta, además, como el programa de doctorado de energías renovables al que pertenece esta tesis requiere, con la introducción de sistemas de recuperación, tanto energéticos como de los subproductos finales obtenidos tras la vida útil de los productos diseñados, para los materiales destinados a la fabricación de los productos mediante la tecnología de fabricación aditiva.

De esta manera, el desarrollo de la presente tesis doctoral conlleva y ha generado conocimiento en forma de aportaciones relevantes en el ámbito de la investigación de la expresión gráfica, por la parte referida a la automatización de la construcción y diseño industrial de los productos, como de la gestión de proyectos y residuos, cuando se trata de los métodos propuestos para la recuperación y reutilización de los productos diseñados tras su eliminación, después de haber cumplido los propósitos marcados a lo largo de su vida útil. Las principales conclusiones obtenidas han sido las siguientes:

- Se diseñaron dos innovadores objetos BIM estructurales de forma libre, aprovechando el uso de material plástico PETG y la tecnología de fabricación FDM. Estos elementos arquitectónicos fueron diseñados como geometrías de forma libre de acuerdo a los requerimientos estéticos, funcionales y técnicos de la implantación urbanística. Se desarrolló un nuevo modelo digital ampliado aplicable a objetos BIM asociados a la fabricación aditiva 3D FDM. Este nuevo modelo incluye las correspondientes propiedades y características tecnológicas asociadas al proceso de fabricación FDM y materiales poliméricos, permitiendo la definición de cualquier elemento en un entorno BIM cuyo proceso de fabricación sea el indicado. La investigación que se presenta en este trabajo es una propuesta integral a nivel industrial en el campo de la construcción 4.0 y potencia las ventajas del uso de polímeros en entornos de fabricación aditiva FDM. Por lo tanto, los profesionales que quieran postular nuevos materiales poliméricos y utilizar la tecnología FDM con polímeros en entornos BIM de construcción 4.0 pueden aprovechar la metodología de trabajo presentada en esta investigación. Los resultados obtenidos sugieren que el uso de la tecnología

FDM junto con el material PETG es prometedor para la fabricación de componentes arquitectónicos que están sujetos a esfuerzos de compresión. El modelo BIM extendido y desarrollado es aplicable en cualquier entorno BIM y para nuevos materiales poliméricos con independencia del formato del modelo digital del elemento estructural.

- El análisis de las pruebas de co-gasificación indican que el objetivo de la valorización energética de los residuos de impresión 3D formados por PETG es posible mediante la gasificación térmica de combustibles mixtos formados por biomasa y un porcentaje de PETG, verificando los resultados experimentales este hecho. La adición de polímeros en la composición de un combustible con una base de biomasa de orujo de aceituna da lugar a un combustible compuesto que favorece la producción de gas de síntesis con altos porcentajes de hidrógeno a temperaturas elevadas en términos de gasificación, es decir, temperaturas mayores a 750 grados Celsius. Además, en el modelo numérico desarrollado a raíz de los ensayos experimentales, la correlación de Pearson derivada de los resultados muestran que, sostenidos en las variables ratio de eficiencia (ER) y temperatura, las composiciones de hasta un 20% de PETG en el combustible, ofrecen un gas de síntesis de alta calidad, alcanzando valores en torno al 15% de concentración de  $H_2$  en su composición. Finalmente, en referencia al porcentaje de  $H_2$  contenido en el gas de síntesis, los combustibles mixtos con contenido de PETG presentan comportamientos más uniformes y menos dispersos en todos los rangos de temperatura. Debido a esto, el contenido de  $H_2$  del gas de síntesis producido mediante este tipo de combustibles mixtos presenta un crecimiento lineal entre las temperaturas de gasificación que van desde los 650 a los 850 grados Celsius.
- La metodología basada en los trabajos de investigación relativos a este documento permite una doble revalorización y reutilización de los subproductos obtenidos a partir de la gasificación utilizando combustibles mixtos de biomasa y plástico, en menor porcentaje, como componente de fabricación de morteros. El camino completo de esta metodología parte de la valorización energética de los residuos polímeros en forma de combustible de gasificación. En un segundo paso, se reutilizan los subproductos obtenidos en este proceso termoquímico. En caso contrario, al ser inertes, el destino de las cenizas debería ser el vertedero. Esta investigación significa un pequeño avance para la sostenibilidad de los recursos existentes en el planeta y el reciclaje de los recursos endógenos y exógenos de un territorio. El ciclo de vida de los polímeros también se incrementa, por lo tanto, la presión de contaminación sobre los ecosistemas debido a estos residuos disminuye. Los resultados de resistencia mecánica de estos morteros ecológicos son aceptables y permiten su aplicación en el campo de la ingeniería civil de forma segura a pesar de la pérdida de resistencia mecánica respecto a los morteros comerciales.

- Como conclusión general de los trabajos de investigación asociados a esta tesis doctoral, se parte de un proyecto de construcción concebido para su ejecución mediante técnicas innovadoras de carácter industrial como es la fabricación aditiva. El material elegido es el PETG debido a sus características tanto físicas como mecánicas y su grado de bondad para la puesta en obra mediante el tipo de manufactura elegida. En la primera parte de la investigación se obtiene una buena coordinación y resultados a niveles de costes, tiempo y cantidades de material utilizados en la ejecución de los diseños BIM, mediante la adaptación propuesta en este documento, pudiendo hablar de optimización en la sostenibilidad en el diseño y ejecución de los proyectos planteados. En cuanto a la recuperación del material tras el desmantelamiento de las estructuras, tal y como se menciona en los dos puntos anteriores, se consiguen buenos resultados experimentales tras el análisis del syngas obtenido mediante la co-gasificación con biomasa. Para terminar, los resultados del comportamiento mecánico de los morteros derivados de los subproductos de gasificación, permiten una valorización de los residuos en forma de cenizas real, con resistencias que alcanzan los 40.4 N/mm<sup>2</sup> en términos de compresión y 4.8 N/mm<sup>2</sup> para la tracción. Estos valores de resistencia mecánica convierten a estos morteros en materiales útiles para la construcción que, en ciertos casos, podrían sustituir a los morteros normalizados.

Para finalizar esta sección, debido al abanico de procesos que esta tesis abarca, se proponen las siguientes líneas de investigación futuras:

Dándose por cumplido el objetivo de recuperación energética y finalmente de la inserción de los subproductos dentro de la economía circular en el campo de la ingeniería civil mediante los trabajos de la segunda parte de esta tesis doctoral. Se proponen trabajos futuros de incorporación de estos datos y resultados dentro de la metodología BIM. El salto a las dimensiones 5D y 6D de la misma serían un argumento de valor en términos de sostenibilidad y automatización dentro de este tipo de proyectos.

En términos de gasificación se plantea probar la configuración de nuevos combustibles de diversos residuos poliméricos y distintas fuentes de biomasa. Mediante la elaboración de nuevos modelos numéricos y simulaciones digitales, a través de softwares dedicados a tal efecto, se plantea la búsqueda de combustibles optimizados en la obtención de syngas de mayor concentración de hidrogeno, más energéticos y con mejores parámetros de los obtenidos en este documento.

Finalmente, se plantea el análisis de otro tipo de cualidades físicas de los morteros modificados con subproductos derivados de la co-gasificación. Si bien mecánicamente los resultados son aceptables, sería de gran interés científico comprobar si las características físicas de los residuos poliméricos que forman parte del Clinker de los morteros confieren a estas propiedades mejoradas en términos de, por ejemplo, aislamiento térmico o eléctrico, resistencias frente a fatiga o

mayores capacidades de deformación antes de la fractura y permeabilidad y comportamiento frente a agentes químicos o agua entre otras cualidades destacables e importantes dentro del ámbito de la construcción.

## 1.6. CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH LINES

This PhD thesis is composed by a research compilation related with digitalization, automation and sustainability during products design process in civil engineering ambit, with the consequent implementation of BIM technology for every stage involved in production cycle of the project. This document tends, furthermore, a multidisciplinary bridge between incipient product management technologies offered by BIM technology in construction sector and industrial sector production design way. The manuscript counts too, as required by renewable energy PhD program which this thesis belong, with recovery systems, energy recovery or by-products valorization, by-products which are obtained after lifespan of designed and produced products based in above-mentioned research papers. These developed products have been manufactured through additive manufacturing technology. In this way, the developed PhD involves and has generated knowledge in form of relevant scientific publications in graphic expression area, in terms of construction sector automation and industrial design methods based in additive manufacturing, and in project and waste management, when proposed tasks are related with energy and waste recovery and/or management methods. Main conclusions obtained from during PhD development are:

- Two novelty structural products were designed and integrated in BIM technology by using polymer materials, PETG in case, and additive manufacturing as fabrication technology. These architectonic elements were designed as free geometrical forms attending to esthetical, functional and technical standard establish requirements. A new extended digital model set up with application in BIM objects, which designed for their manufacture through additive manufacturing, were developed. This model include corresponding properties and characteristics associated to FDM manufacture process in polymers. It allows the definition of every object inside BIM digital ambit as long as the fabrication method were the indicated. Research presented in this thesis is an integral proposal at industrial level in construction 4.0 field and boost the advantages offered by polymers in additive manufacturing technology application. So, professionals who desire to apply distinct polymers materials in combination with additive manufacturing as fabrication process are able to use the methodology described in this study to integrate created elements in BIM digital ambit. Obtained results suggest FDM technology in construction sector, by using PETG as raw material, presents a promising future in architectonic components fabrication that are submitted to compression loads. Developed extended BIM model can be apply in all BIM ambits and to different polymer materials regardless of primary digital model format of the structural studied element.

- Co-gasification tests analysis indicate the objective of energy recovery polymers waste produced through additive manufacturing is possible by applying thermal gasification process of mixed fuels formed by combine biomass with a PETG percentage residues, this fact has been verify by obtained experimental results. Polymer addition in fuel composition based in olive pomace biomass generates a composed fuel which favor synthesis gas production with elevate hydrogen percentage at high temperatures in terms of gasification, it means, around 750 Celsius degrees. Furthermore, developed numerical model, according to experimental tests, sustained in efficiency ratio and temperature as variables shows that fuels compositions which contain until 20% PETG percentage produce, after its gasification, high quality syngas reaching hydrogen values in percentage around 15%. Finally, in terms of H<sub>2</sub> concentration, mixed fuels with PETG content present more uniform and less disperse behaviors in every range of gasification temperature. Due to this fact, H<sub>2</sub> content in produced syngas from these kind of fuels shows a lineal growth in concordance with gasification temperature increase in range between 650 and 850 Celsius degrees.
- Methodology based in research belong to this document allows a double valorization and reuse from obtained by-products which belong to mixed fuel gasification through their utilization as cement clinker partial substitutes in modified mortars. Complete path of this methodology starts with energy recovery of polymer included in mixed fuel, based in biomass, as additive for a gasification process. In a second step, by-products obtained after above mentioned thermochemical process are reuse. Otherwise, inert generated during gasification process would be destined directly to landfill. This research present a small advance to the sustainability of existent resources in planet and recycling of endogenous or exogenous resources of a territory. Lifespan of polymers is increased too, so, the contamination pressure over ecosystems produced by this kind of residues decrease. Mechanical test results from modified mortars are reasonable and allow their application in civil engineer field in safety way, despite mechanical loss strength in comparison with commercial mortars.
- As a general conclusion of the research associated with this doctoral thesis, it starts from a construction project conceived for execution using innovative industrial techniques such as additive manufacturing. The chosen material is PETG due to its physical and mechanical characteristics and its suitability for the chosen manufacturing method. In the first part of the research, good coordination and results are achieved in terms of costs, time, and quantities of materials used in the execution of BIM designs, through the proposed adaptation in this document. This can be referred to as optimization in sustainability in the design and execution of the proposed projects. Regarding the material recovery after dismantling the structures, as mentioned in the previous two points, good experimental results are obtained after analyzing the

syngas obtained through co-gasification with biomass. To conclude, the results of the mechanical behavior of mortars derived from gasification by-products allow valorization of waste in the form of real ashes, with compressive strengths reaching 40.4 N/mm<sup>2</sup> and 4.8 N/mm<sup>2</sup> for traction. These mechanical strength values make these mortars useful materials for construction, which in certain cases could replace standardized mortars.

To finish this section, due to the range of processes covered in this thesis, the following lines of future research are proposed:

Having achieved the objective of energy recovery and finally the integration of by-products into the circular economy in the field of civil engineering through the work in the second part of this doctoral thesis, future work is proposed to incorporate these data and results into the BIM methodology. The transition to the 5D and 6D dimensions would be a value argument in terms of sustainability and automation within these types of projects.

In terms of gasification, testing the configuration of new fuels from various polymeric residues and different sources of biomass is proposed. By developing new numerical models and digital simulations through dedicated software, the search for optimized fuels in obtaining syngas with higher hydrogen concentration, more energetic, and with better parameters than those obtained in this document is proposed.

Finally, the analysis of other physical qualities of mortars modified with by-products derived from co-gasification is proposed. While mechanically the results are acceptable, it would be of great scientific interest to verify whether the physical characteristics of polymeric residues that are part of the mortars' clinker confer improved properties in terms of, for example, thermal or electrical insulation, resistance to fatigue, greater deformation capacities before fracture, and permeability and behavior against chemical agents or water, among other notable and important qualities within the construction industry.



## 1.7. REFERENCIAS

- [1] Liu, Z., Jiang, L., Osmani, M., & Demian, P. (2019). Building information management (BIM) and blockchain (BC) for sustainable building design information management framework. *Electronics*, 8(7), 724. <https://doi.org/10.3390/electronics8070724>
- [2] Demian, P., & Walters, D. (2014). The advantages of information management through building information modelling. *Construction management and economics*, 32(12), 1153-1165. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.777754>
- [3] <https://www.fiec-ar.eu/2021/en/> (accessed on 26/06/2023)
- [4] <https://ec.europa.eu/eurostat> (accessed on 26/06/2023)
- [5] European Construction Forum, 2017
- [6] <https://cibim.mitma.es/> (accessed on 26/06/2023)  
(<https://cibim.mitma.es/~:text=BENEFICIOS,Construction%20Sector%20Observatory>) (accessed on 26/06/2023)
- [7] <http://futureofconstruction.org/content/uploads/2016/09/BCG-Digital-in-Engineering-and-Construction-Mar-2016.pdf> (accessed on 26/06/2023)
- [8] Diaz-Perete, D., Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J. M., & Martin-Doñate, C. (2019, June). Plates Pre-dimensioning for Injection Molds by Using Computational Design and Inclusion of the Parts in BIM Methodology. In *International conference on The Digital Transformation in the Graphic Engineering* (pp. 535-543). Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-41200-5\_59
- [9] Barbosa, F., Woetzel, J., & Mischke, J. (2017). Reinventing construction: A route of higher productivity. McKinsey Global Institute, 98-103. McKinsey Global Institute February 2017 Copyright © McKinsey & Company [www.mckinsey.com/mgi](http://www.mckinsey.com/mgi)  
<http://dln.jaipuria.ac.in:8080/jspui/bitstream/123456789/2898/1/MGI-Reinventing-Construction-Full-report.pdf>
- [10] Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of production economics*, 204, 383-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- [11] Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2013). The project benefits of building information modelling (BIM). *International journal of project management*, 31(7), 971-980. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001>

- [12] Zhang, S., Zhongfu, L. I., Tianxin, L. I., & Mengqi, Y. U. A. N. (2021). A holistic literature review of building information modeling for prefabricated construction. *Journal of Civil Engineering and Management*, 27(7), 485-499. <https://doi.org/10.3846/jcem.2021.15600>
- [13] Diaz-Perete, D., Mercado-Colmenero, J. M., Valderrama-Zafra, J. M., & Martin-Doñate, C. (2020). New procedure for BIM characterization of architectural models manufactured using fused deposition modeling and plastic materials in 4.0 advanced construction environments. *Polymers*, 12(7), 1498. <https://doi.org/10.3390/polym12071498>
- [14] Mercado-Colmenero, J. M., Paramio, M. A. R., Perez-Garcia, J. M., & Martin-Doñate, C. (2016). A new hybrid method for demoldability analysis of discrete geometries. *Computer-Aided Design*, 80, 43-60. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.06.006>
- [15] Mercado-Colmenero, J. M., Rubio-Paramio, M. A., de Juanes Marquez-Sevillano, J., & Martin-Doñate, C. (2018). A new method for the automated design of cooling systems in injection molds. *Computer-Aided Design*, 104, 60-86. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.06.001>
- [16] Nguyen, D. S., & Vignat, F. (2017, December). Topology optimization as an innovative design method for additive manufacturing. In 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 304-308). IEEE. DOI:10.1109/IEEM.2017.8289901
- [17] Li, S., Yuan, S., Zhu, J., Wang, C., Li, J., & Zhang, W. (2020). Additive manufacturing-driven design optimization: Building direction and structural topology. *Additive Manufacturing*, 36, 101406. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101406>
- [18] Ding, Z., Liu, S., Liao, L., & Zhang, L. (2019). A digital construction framework integrating building information modeling and reverse engineering technologies for renovation projects. *Automation in Construction*, 102, 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.012>
- [19] Paolini, A., Kollmannsberger, S., & Rank, E. (2019). Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive manufacturing*, 30, 100894. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>
- [20] <https://www.makmax.com.au/> (accessed on 26/06/2023)
- [21] <https://www.volkerwessels.com>  
(<https://www.volkerwessels.com/en/news/volkerwessels-introduces-the-plasticroad>) (accessed on 26/06/2023)
- [22] Wildenauer, A. A. (2020). Critical assessment of the existing definitions of BIM dimensions on the example of Switzerland. *terminology*, 23, 24. DOI:10.34218/IJCIET.11.4.2020.012

- [23] Koutamanis, A. (2020). Dimensionality in BIM: Why BIM cannot have more than four dimensions?. *Automation in Construction*, 114, 103153. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103153>
- [24] WCED – World Commission on Environment and Development (1987): *Our Common Future*. Oxford. (<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>) (accessed on 26/06/2023)
- [25] Klöpffer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products: (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13, 89-95. <http://dx.doi.org/10.1065/lca2008.02.376>
- [26] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010
- [27] Ortigosa, R., Ruiz, D., Gil, A. J., Donoso, A., & Bellido, J. C. (2020). A stabilisation approach for topology optimisation of hyperelastic structures with the SIMP method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 364, 112924. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.112924>
- [28] Winsun is the World's First High-Tech Company which Truly Achieves 3D-Printing Architecture. *3D Printing Architecture's Future*. Available online: <http://www.winsun3d.com> (accessed on 26/06/2023)
- [29] 3DPrint.com. Available online: <https://3dprint.com/94558/3d-printed-hotel-lewis-grand/> (accessed on 26/06/2023)
- [30] ApisCor, The First On-Site House has been Printed in Russia | Apis Cor. We Print Buildings. Available online: <http://apis-cor.com> (accessed on 26/06/2023)
- [31] Díaz-Perete, D., Hermoso-Orzáez, M. J., Carmo-Calado, L., Martín-Doñate, C., & Terrados-Cepeda, J. (2023). Energy Recovery from Polymeric 3D Printing Waste and Olive Pomace Mixtures via Thermal Gasification—Effect of Temperature. *Polymers*, 15(3), 750. <https://doi.org/10.3390/polym15030750>
- [32] Díaz-Perete, D., Hermoso-Orzáez, M. J., Terrados-Cepeda, J., Silva-Romano, P., & Martín-Doñate, C. (2023). WEEE polymers valorization, its use as fuel in the gasification process and revaluation of the inert by-products obtained: Sustainable mortars as a solution. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20194>
- [33] Kaewunruen, S., Sresakoolchai, J., & Zhou, Z. (2020). Sustainability-based lifecycle management for bridge infrastructure using 6D BIM. *Sustainability*, 12(6), 2436. <https://doi.org/10.3390/su12062436>

- [34] Ullah, K., Lill, I., & Witt, E. (2019, May). An overview of BIM adoption in the construction industry: Benefits and barriers. In 10th Nordic conference on construction economics and organization (Vol. 2, pp. 297-303). Emerald Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/S2516-285320190000002052>
- [35] Uriz, A. L., Sanz, C., & Sánchez, B. (2019). Aplicación de un modelo Lean-BIM para la mejora de la productividad en redacción de proyectos de edificación. *Informes de la Construcción*, 71(556), e313-e313. DOI:10.3989/ic.67222
- [36] Daniotti, B., Pavan, A., Lupica Spagnolo, S., Caffi, V., Pasini, D., Mirarchi, C., ... & Mirarchi, C. (2020). Collaborative working in a BIM environment (BIM platform). *BIM-based collaborative building process management*, 71-102. DOI:10.1007/978-3-030-32889-4\_4
- [37] Kjartansdóttir, I. B., Mordue, S., Nowak, P., Philp, D., & Snæbjörnsson, J. T. (2017). *Building information modelling-BIM*. Warsaw, Poland: Civil Engineering Faculty of Warsaw University of Technology. \*\*\*\*
- [38] Whyte, J., Bouchlaghem, N., Thorpe, A., & McCaffer, R. (2000). From CAD to virtual reality: modelling approaches, data exchange and interactive 3D building design tools. *Automation in construction*, 10(1), 43-55. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(99\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(99)00012-6)
- [39] Abualdenien, J., & Borrmann, A. (2022). Levels of detail, development, definition, and information need: A critical literature review. *Journal of Information Technology in Construction*, 27, 363-392. DOI: 10.36680/j.itcon.2022.018
- [40] Mercado-Colmenero, J. M., La Rubia, M. D., Mata-Garcia, E., Rodriguez-Santiago, M., & Martin-Doñate, C. (2020). Experimental and numerical analysis for the mechanical characterization of petg polymers manufactured with fdm technology under pure uniaxial compression stress states for architectural applications. *Polymers*, 12(10), 2202. <https://doi.org/10.3390/polym12102202>
- [41] <https://all3dp.com/1/best-cad-software/> (accessed on 26/06/2023)
- [42] Mawed, M., Al Nuaimi, M. S., & Kashawni, G. (2020). Construction and demolition waste management in the uae: Application and obstacles. *GEOMATE Journal*, 18(70), 235-245. <https://doi.org/10.21660/2020.70.45101>
- \*[43] Xue, K., Hossain, M. U., Liu, M., Ma, M., Zhang, Y., Hu, M., ... & Cao, G. (2021). BIM integrated LCA for promoting circular economy towards sustainable construction: an analytical review. *Sustainability*, 13(3), 1310. <https://doi.org/10.3390/su13031310>
- [44] Lu, Q., Xie, X., Heaton, J., Parlikad, A. K., & Schooling, J. (2020). From BIM towards digital twin: Strategy and future development for smart asset management. *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future: Proceedings of SOHOMA 2019 9*, 392-404.

DOI:10.1007/978-3-030-27477-1\_30

- [45] Polymers in building construction, Report 154, Sue Halliwell, Report 154, Rapra Review Report , Volume 13, number 10, ISSN:0889-3144
- [46] Global Ocean Commission, 2015 “Plastics - Keeping them out of the ocean”
- [47] Fogarasi, S.; Imre-Lucaci, F.; Fogarasi, M.; Imre-Lucaci, Á. Technical and environmental assessment of selective recovery of tin and lead from waste solder alloy using direct anodic oxidation. *Journal of Cleaner Production* 2019, 213, 872-883.doi:10.1016/j.jclepro.2018.12.101
- [48] Pashchenko, D. Thermodynamic equilibrium analysis of combined dry and steam reforming of propane for thermochemical waste-heat recuperation. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017, 42, 14926-14935.doi:10.1016/j.ijhydene.2017.04.284.
- [49] Kasper, A.C.; Berselli, G.B.T.; Freitas, B.D.; Tenório, J.A.S.; Bernardes, A.M.; Veit, H.M. Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper. *Waste Management* 2011, 31, 2536-2545. doi:10.1016/j.wasman.2011.08.013.
- [50] Basu, P.; Acharya, B.; Dutta, A. Gasification in fluidized beds – present status & design. 20 th International conference on fluidized bed combustion 2009, 1, 1–7.
- [51] David Ayre, Technology advancing polymers and polymer composites towards sustainability: A review, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Volume 13, 2018, Pages 108-112,ISSN 2452-2236, <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.06.018>



## CAPÍTULO 2: COMPENDIO DE TRABAJOS PUBLICADOS

La presente tesis doctoral se conforma como un compendio de tres artículos de investigación que cumplen los criterios establecidos por la Comisión Nacional Evaluadora de la Actividad Investigadora (CNEAI). De los cuales dos de ellos se encuentran publicados en revistas científicas de alto impacto y calidad reconocida, indexadas en las bases de datos bibliográficas y bibliométricas ISI JCR (Journal Citation Reports), ISI WOS (Web of Science) e ISIS Scopus. El doctorando aparece como primer autor en cada una de las publicaciones y las fechas de publicación de las mismas están comprendidas entre el inicio y final de los estudios de doctorado del autor. Asimismo, conforme a la normativa de la Universidad de Jaén para la defensa de tesis doctorales (Extracto de los artículos del reglamento de estudio de doctorado de la Universidad de Jaén adaptada a las directrices del R.D. 99/2011 y aprobado en Consejo de Gobierno el 6 de febrero de 2012), estos artículos se enmarcan en el área del conocimiento de la presente tesis y se adjuntan obligatoriamente en esta segunda parte de la memoria. Además, para completar el compendio de trabajos de investigación, se citan tres aportaciones relevantes efectuadas en congresos nacionales e internacionales surgidas, en paralelo, durante la etapa investigadora de la presente tesis doctoral.



## 2.1. ARTÍCULOS PUBLICADOS EN REVISTAS JCR

1. **Díaz-Perete D.**, Mercado-Colmenero J.M., Valderrama-Zafra J.M., Martín-Doñate C. “New Procedure for BIM Characterization of Architectural Models Manufactured Using Fused Deposition Modeling and Plastic Materials in 4.0 Advanced Construction Environments”. *Polymers*. 2020; 12(7):1498. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12071498>.
2. **Díaz-Perete D.**, Hermoso-Orzáez M.J., Carmo-Calado L., Martín-Doñate C., Terrados-Cepeda J. “Energy Recovery from Polymeric 3D Printing Waste and Olive Pomace Mixtures via Thermal Gasification—Effect of Temperature”. *Polymers*. 2023; 15(3):750. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15030750>
3. **Díaz-Perete D.**, Hermoso-Orzáez, M. J., Terrados-Cepeda, J., Silva-Romano, P., & Martín-Doñate, C. (2023). WEEE polymers valorization, its use as fuel in the gasification process and revaluation of the inert by-products obtained: Sustainable mortars as a solution. *Heliyon*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20194>



1. **Referencia:** Diaz-Perete, D., Mercado-Colmenero, J. M., Valderrama-Zafra, J. M., & Martin-Doñate, C. (2020). New procedure for BIM characterization of architectural models manufactured using fused deposition modeling and plastic materials in 4.0 advanced construction environments. *Polymers*, 12(7), 1498.
2. **Breve resumen:** Este artículo presenta un nuevo procedimiento para la caracterización del modelado de información para la construcción (BIM) de topologías estructurales fabricadas con materiales plásticos y tecnología aditiva de modelado por deposición fundida (FDM). El procedimiento presentado aquí transforma la geometría arquitectónica en un modelo tridimensional expandido, capaz de vincular directamente la topología de la estructura de plástico con los requisitos tecnológicos, funcionales y económicos para trabajar en entornos avanzados de construcción 4.0. El modelo incorpora un nuevo algoritmo cuyo objetivo es reconocer la superficie topológica de la parte estructural de plástico, obteniendo de manera completamente automatizada el tiempo de fabricación de FDM y el costo de fabricación. El nuevo algoritmo parte de la superficie geométrica voxelizada del modelo arquitectónico, calculando el tiempo de fabricación a partir del recorrido geométrico completo realizado por el extrusor en un voxel, la velocidad del extrusor, el patrón de impresión y la altura de la capa. De esta manera, es posible obtener un modelo digital completo capaz de gestionar y analizar el objeto arquitectónico de plástico en un entorno avanzado de BIM 4.0. El modelo presentado en este artículo se aplicó a dos estructuras arquitectónicas diseñadas para un entorno urbano real. Las geometrías estructurales finales se obtuvieron mediante procesos topológicos con el fin de reducir el material plástico crudo de fabricación y mejorar la resistencia de la estructura de plástico. Los elementos arquitectónicos se validaron estructuralmente mediante simulaciones numéricas, siguiendo el escenario de cargas y condiciones de contorno requeridos para el proyecto real. Los mapas de desplazamiento indican un valor máximo de 0.5 mm de acuerdo con los requisitos del proyecto. Los campos de

esfuerzos de Von Mises indican valores máximos de 0.423 y 0.650 MPa, sin superar en ningún caso la resistencia a la tracción del material termoplástico.

3. **Fecha de publicación:** 4 de Julio de 2020.
4. **Estado:** Publicado
5. **Tipo de publicación:** Artículo científico
6. **Categoría:**
7. **Ubicación:** <https://doi.org/10.3390/polym12071498>
8. **Otros datos de interés:** Revista indexada en JCR, 1<sup>er</sup> cuartil



1. **Referencia:** Díaz-Perete, D., Hermoso-Orzáez, M. J., Carmo-Calado, L., Martín-Doñate, C., & Terrados-Cepeda, J. (2023). Energy Recovery from Polymeric 3D Printing Waste and Olive Pomace Mixtures via Thermal Gasification—Effect of Temperature. *Polymers*, 15(3), 750.
2. **Breve resumen:** Uno de los materiales poliméricos utilizados en las impresoras 3D más comunes es el polietilentereftalato glicol (PETG). Representa, a nivel mundial, alrededor del 2.3% del material polimérico utilizado en la fabricación aditiva. Sin embargo, después de procesar este material, sus propiedades cambian de forma irreversible. Se produce una cantidad significativa de residuos en todo el mundo y su disposición generalmente se destina a vertederos o incineración, lo que puede generar un problema importante debido a los altos riesgos ambientales. Los desechos poliméricos de la impresión 3D, en adelante 3DPPW, tienen un valor calorífico relativamente alto y características adecuadas para ser valorados en procesos termoquímicos. La gasificación emerge como una solución innovadora y alternativa para recuperar energía a partir de 3DPPW, mezclado con residuos de origen lignocelulósico, y presenta algunas ventajas ambientales en comparación con otros tipos de tratamientos termoquímicos, ya que el proceso de gasificación libera cantidades menores de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub> en la atmósfera. En el caso del estudio, se llevó a cabo la co-gasificación de orujo de oliva (OLB) con pequeñas adiciones de 3DPPW (10% y 20%) a diferentes temperaturas. Al comparar las diferentes gasificaciones (100% OLB, 90% OLB + 10% 3DPPW, 80% OLB + 20% 3DPPW), se obtuvieron los mejores resultados para el gas de síntesis en la mezcla del 10% de 3DPPW y el 90% de orujo de oliva (OLB), con un valor calorífico inferior de 6.16 MJ/m<sup>3</sup>, rendimiento de gas de síntesis del 3.19% y eficiencia del gas frío del 87.85% para una temperatura de gasificación de 750 °C. Además, los resultados demuestran que la adición de 3DPPW mejoró la calidad del gas de síntesis, especialmente entre las temperaturas de 750 y 850 °C. Incluir materiales poliméricos de impresión 3D en el contexto de la economía circular y extender su ciclo de vida ayuda a mejorar la eficiencia de los

procesos industriales posteriores, reduciendo los costos del proceso en general, gracias al nuevo valor industrial adquirido por los subproductos generados.

3. **Fecha de publicación:** 1 de febrero 2023.
4. **Estado:** Publicado
5. **Tipo de publicación:** Artículo científico
6. **Categoría:**
7. **Ubicación:** <https://doi.org/10.3390/polym15030750>
8. **Otros datos de interés:** Revista indexada en JCR, 1<sup>er</sup> cuartil.



1. **Referencia:** Díaz-Perete, D., Hermoso-Orzáez, M. J., Terrados-Cepeda, J., Silva-Romano, P., & Martín-Doñate, C. (2023). WEEE polymers valorization, its use as fuel in the gasification process and reevaluation of the inert by-products obtained: Sustainable mortars as a solution. *Heliyon*, 9(9).
2. **Breve resumen:** La producción global de materiales poliméricos ha aumentado de forma explosiva en las últimas décadas. Sus propiedades mecánicas, resistencia a la erosión y corrosión, buen rendimiento como materiales aislantes y su facilidad y flexibilidad de fabricación han convertido a los polímeros en uno de los materiales más ampliamente utilizados en la industria y en la vida diaria. Varias instituciones y gobiernos están comenzando a plantear preocupaciones ambientales y ecológicas serias con impacto internacional inminente, debido al creciente nivel de producción de polímeros, que no parece disminuir. Es necesario que la comunidad científica haga esfuerzos en el desarrollo y evaluación de nuevas metodologías para permitir la inclusión de estos tipos de materiales en la economía circular de diversos sectores de producción. Esto es importante para reducir el impacto ecológico causado por el actual nivel de producción global de polímeros. Uno de los métodos más utilizados para la recuperación de materiales poliméricos es la valorización energética a través de procesos termoquímicos. Un ejemplo de esto es la gasificación térmica utilizando combustibles compuestos de biomasa y una mezcla de residuos poliméricos de equipos eléctricos y electrónicos (RAEE). A través de este proceso termoquímico, se obtiene gas de síntesis de alto valor energético, con una alta concentración de hidrógeno, por un lado, mientras que, por otro lado, se generan productos de desecho en forma de carbones, cenizas y escorias. Este manuscrito presenta una metodología de estudio detallada que comienza con el análisis químico de la materia prima e incluye análisis posteriores de resultados mecánicos para la revalorización de estos subproductos inertes residuales, utilizándolos como sustitutos parciales en el clínker de cemento para producir morteros de construcción. Esta metodología

descrita influye directamente en el LCC (Costo del Ciclo de Vida) de los productos finales diseñados en plástico y extiende el ciclo de vida del material plástico. Los materiales plásticos están aquí para quedarse, por lo que el estudio y la optimización de los procesos de recuperación de residuos poliméricos son vitales para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Unión Europea en términos de eficiencia y sostenibilidad. También es la única manera posible de crear un futuro mundial ambientalmente sostenible para las generaciones futuras. Después de aplicar la metodología descrita, los resultados de las pruebas mecánicas muestran que los morteros modificados presentan un comportamiento estable durante el tiempo de endurecimiento y un crecimiento de resistencia similar en comparación con los morteros comerciales. Las máximas resistencias mecánicas alcanzadas, incluyendo resistencia a la compresión y flexión, hacen que los morteros modificados sean una opción viable para varias aplicaciones en el sector de la ingeniería civil.

3. **Fecha de publicación:** 15 de septiembre de 2023.
4. **Estado:** Publicado
5. **Tipo de publicación:** Artículo científico
6. **Categoría:**
7. **Ubicación:** <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20194>
8. **Otros datos de interés:** Revista indexada en JCR, 2º cuartil.



## 2.2. COMUNICACIONES A CONGRESOS INTERNACIONALES Y NACIONALES

1. **Díaz-Perete D.**, Mercado-Colmenero, J.M., Torres-Alba, A., Martin-Doñate, C. (2021) Aplicación de análisis dimensional y escalado para el diseño de un elemento constructivo tipo BIM. Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Anales de ingeniería Mecánica-Revista de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica, Año 22, Jaén, octubre 2021
2. **Díaz-Perete D.**, Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J.M., Martin-Doñate, C. (2020). Plates Pre-dimensioning for Injection Molds by Using Computational Design and Inclusion of the Parts in BIM Methodology. In: Cavas-Martínez, F., Sanz-Adan, F., Morer Camo, P., Lostado Lorza, R., Santamaría Peña, J. (eds) Advances in Design Engineering. INGEGRAF 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-41200-5\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41200-5_59)
3. **Díaz-Perete D.**, Hermoso-Orzaez, M.J., Carmo-Calado, L., Mota-Panizio, R., Brito, P. (2023). Analysis of the Mechanical Behaviour of Modified Mortars with Ash Residues from Biomass Gasification with WEEE Plastics. In: , et al. Proceedings of the 2nd International Conference on Water Energy Food and Sustainability (ICoWEFS 2022). ICoWEFS 2022. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6_14).



1. **Referencia:** Díaz-Perete D., Mercado-Colmenero, J.M., Torres-Alba, A., Martín-Doñate, C. (2021) Aplicación de análisis dimensional y escalado para el diseño de un elemento constructivo tipo BIM.

2. **Breve resumen:** La manufactura de modelos a escala reducida es un recurso ampliamente utilizado para el diseño, dimensionamiento y validación de elementos constructivos con grandes dimensiones. El análisis experimental a escala real de éstos se encuentra principalmente limitado por la capacidad tecnológica para reproducir los escenarios de cargas y las condiciones de contorno al que están sometidos, junto al elevado coste económico, temporal y espacial asociados a la manufactura del prototipo y su posterior experimentación. Por ello, en el presente trabajo de investigación se propone emplear el teorema  $\pi$  de Buckingham para la determinación de los parámetros principales que relacionan los modelos reales y modelos a escala de elementos constructivos parametrizados de tipo Building Information Modelling (BIM). La geometría, escenario de cargas y condiciones de contornos de estos modelos se diseñan para validar los requerimientos funcionales y estructurales que relacionan los modelos propuestos con el elemento estructural parametrizado de tipo BIM objeto de estudio.

Los tres factores de escala independientes, que representan las tres dimensiones fundamentales establecidas para el desarrollo de los modelos, son: masa, longitud y tiempo. A partir de ellos, se determinan las predicciones numéricas de la distribución del mapa de tensiones y el campo de desplazamientos en régimen elástico bajo el escenario de carga y las condiciones de contorno al que se encuentra sometido el elemento objeto de estudio. Para elaborar y validar el estudio de los modelos a escala del análisis dimensional, se definen prototipos virtuales mediante un software numérico estructural de tipo FEM. La validez de estos modelos numéricos a escala depende de las propiedades del material, la precisión de su manufactura y el escenario de cargas y condiciones de contorno al que se encuentran sometidos. Asimismo, los resultados obtenidos a partir de la predicción definida por el análisis dimensional se comparan con los resultados numéricos obtenidos para modelo numérico del elemento constructivo parametrizado de tipo BIM objeto de estudio. El empleo de la metodología propuesta en el presente trabajo de investigación permite reducir y optimizar tiempos y costes asociados a las fases iniciales de diseño y dimensionamiento de elementos constructivos con grandes dimensiones.

3. **Fecha de publicación:** 16 de febrero de 2022.
4. **Estado:** Publicado
5. **Tipo de publicación:** Conference paper
6. **Categoría:**
7. **Ubicación:** Revista de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica, Año 22, Jaén, octubre 2021.
8. **Otros datos de interés:** Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Anales de ingeniería Mecánica



1. **Referencia:** Diaz-Perete, D., Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J. M., & Martin-Doñate, C. (2019, June). Plates Pre-dimensioning for Injection Molds by Using Computational Design and Inclusion of the Parts in BIM Methodology. In International conference on The Digital Transformation in the Graphic Engineering (pp. 535-543). Cham: Springer International Publishing.
2. **Breve resumen:** Este artículo presenta un algoritmo para el predimensionamiento de placas de moldes de inyección basado en las medidas de la pieza que se fabricará. Las placas de predimensionamiento son: la placa de la cavidad, la placa del núcleo y la placa de soporte. Estas placas se predimensionarán de acuerdo con las cargas de presión generadas en cada caso, derivadas de los requisitos específicos necesarios para la inyección y fabricación de cada parte de plástico. Además, las ecuaciones utilizadas se introducirán en software de diseño computacional vinculando cada variable con su parámetro relativo para generalizar el proceso de diseño de moldes de inyección para partes de plástico simples. Después del proceso de cálculo y el predimensionamiento de las placas, la geometría final se introducirá en la metodología BIM utilizando software BIM específico para medir las cantidades de material requeridas, recopilar dimensiones y número de partes necesarias de manera automática para obtener otros atributos interesantes como el control del presupuesto. La implementación de la metodología BIM en la industria de moldes de inyección para el desarrollo de proyectos brinda al campo de la ingeniería muchas nuevas posibilidades de colaboración entre empresas, facilitando la comunicación entre sus especialistas en diseño y optimizando el proceso de creación de nuevos moldes de inyección. Esta metodología contribuirá a ahorrar recursos mejorando la calidad de los resultados finales de los proyectos.
3. **Fecha de publicación:** 10 de marzo de 2020.
4. **Estado:** Publicado
5. **Tipo de publicación:** Conference paper

6. **Categoría:**
7. **Ubicación:** [https://doi.org/10.1007/978-3-030-41200-5\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41200-5_59)
8. **Otros datos de interés:** Springer, capítulo de libro.



1. **Referencia:** Díaz-Perete D., Hermoso-Orzaez, M.J., Carmo-Calado, L., Mota-Panizio, R., Brito, P. (2023). Analysis of the Mechanical Behaviour of Modified Mortars with Ash Residues from Biomass Gasification with WEEE Plastics. In: , et al. Proceedings of the 2nd International Conference on Water Energy Food and Sustainability (ICoWEFS 2022). ICoWEFS 2022. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6_14).
2. **Breve resumen:** La biomasa fue la principal fuente de energía para la humanidad hasta la llegada de la Revolución Industrial, momento en el cual fue relegada al segundo plano con la aparición de los combustibles fósiles. El uso de biomasa residual, que proviene de residuos sólidos urbanos (RSU) producidos por los humanos durante el desarrollo de sus actividades diarias y económicas para la generación de energía, ya es una obligación en entornos conscientes de la eficiencia energética y la sostenibilidad. La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico para la generación de energía a partir de ella. Este método de generación tiene cierta ventaja sobre el resto de las alternativas gracias al producto obtenido. El biogás, altamente energético, resuelve un problema habitual que la humanidad ha enfrentado durante décadas, ya que, tanto en forma gaseosa como líquida, el gas es almacenable y las pérdidas de almacenamiento son mínimas en comparación con otros tipos de fuentes de energía. Este manuscrito presenta un estudio para la recuperación de subproductos inertes residuales derivados del proceso de gasificación de biomasa y su uso en la producción de morteros para reemplazar los agregados de cantera comúnmente utilizados en la producción de concreto y mortero. Dándole una segunda vida a una fracción de los materiales residuales existentes, manteniendo la línea de sostenibilidad y eficiencia en cuanto a la gestión de residuos y reciclaje.

3. **Fecha de publicación:** 27 de febrero de 2023.
4. **Estado:** Publicado
5. **Tipo de publicación:** Conference Paper
6. **Categoría:**
7. **Ubicación:** [https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6_14)
8. **Otros datos de interés:** Springer, capítulo de libro.

